

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**Sistemas de Apoio à Medição e Verificação do  
Desempenho Energético**

Gilberto Marques da Silva

Dissertação realizada no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Monteiro

Julho de 2009



A Dissertação intitulada

“Sistemas de Apoio à Medição e Verificação do Desempenho Energético”

foi aprovada em provas realizadas em 16 /Julho/2009

o júri

Presidente



Professor Doutor Carlos Manuel de Araújo Sá  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de  
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Professor Doutor Nuno Paulo Correia e Afonso Moreira  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharias da Universidade de Trás-os-  
Montes e Alto Douro



Professor Doutor Cláudio Domingos Martins Monteiro  
Professor Auxiliar Departamento de Engenharia Electrotécnica e de  
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da  
sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não  
explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros  
extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e  
demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados.

Autor – Gilberto Marques da Silva



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



# Resumo

A preocupação a nível mundial com questões climatéricas tem induzido os países a estabelecerem, entre outros, mecanismos de combate à emissão de gases de efeito de estufa e à produção de energia a partir de combustíveis fósseis. Assim, a introdução de energias renováveis na produção de energia tem tomado uma dimensão significativa, contudo a necessidade de mitigar o consumo energético elevado e ineficiente deverá ter primazia, de forma a se alcançarem os objectivos definidos no protocolo de Quioto.

Para se aumentar a eficiência energética, é necessário substituir alguns equipamentos e acompanhar a evolução das medidas de racionalização energética, bem como apelar à utilização racional de energia por parte dos utilizadores das instalações. A implementação destas medidas implica investimentos, porém nem sempre as empresas têm disponibilidade financeira, surgindo então, os contratos de desempenho energético (EPC - *Energy Performance Contracts*) para medidas de eficiência energética.

A Medição e Verificação (M&V) é uma questão fundamental na concepção dos EPC, pois permite o cálculo das economias, fazendo com que se crie um contrato fiável, aumentando a confiança nas MRE's (medidas de racionalização energética).

No âmbito desta dissertação, foram exploradas as opções de M&V para os períodos antes e depois da MRE, de forma a determinar-se um nível de poupanças com um mínimo de incerteza. Também foram criadas ferramentas de apoio à M&V, permitindo uma escolha ponderada entre a metodologia matemática mais adequada.

As poupanças energéticas possuem, inevitavelmente, uma incerteza associada. Para a sua determinação foram estabelecidos vários modelos de cálculo de incertezas, tendo em vista a definição de um sistema de apoio à decisão.

**Palavras-chave:** Medição & Verificação, Eficiência energética, metodologias de M&V



# Abstract

The worldwide concern with climate issues has led the countries to establish, among other things, mechanisms to combat the emission of greenhouse gases and the production of energy from fossil fuels. Thus, the introduction of renewable energy production has progressively been more significant; however the need to diminish the waste of energy should take precedence in order to meet the objectives defined in the Kyoto Protocol.

To increase energy efficiency, it's necessary to replace some equipment and monitoring the development of energy conservation measures (ECM) and appeal to the rational use of energy from the facilities users. The implementation of these measures require investment, but companies are not always available financial, arise then, the energy performance contracts (EPC) for energy efficiency measures.

The Measurement and Verification (M&V) is a key issue in the design of the ECM, it allows the savings calculation, making a contract to create reliable, increasing confidence in ECM's.

In this dissertation, was explored the M&V options for baseline period and reporting period, the ECM in order to determine the level of savings with a minimum of uncertainty. Were also created tools to support M&V, allowing a choice between the mathematical methodology most appropriate.

The energy savings have, inevitably, an uncertainty. For their determination were established several models for calculation of uncertainties in order to define a decision support system.

**Keywords:** Measurement & Verification, Energy Efficiency, M&V methodologies.





# Agradecimentos

A presente Dissertação não significa apenas o resultado de muitas horas de estudo, investigação e esforço ao longo deste semestre, representa também o derradeiro objectivo desta fase académica, ao qual não era possível sem um importante número de pessoas.

Estou especialmente agradecido ao Prof. Cláudio Monteiro, por toda a disponibilidade, apoio, interesse e sugestões transmitidas na realização da dissertação.

Ao Eng. Rui Azevedo pela disponibilidade revelada, pelas críticas e sugestões relevantes feitas durante este semestre e por estar sempre pronto para me dar acesso a todos os dados que precisei.

À empresa *SmartWatt* por todos dados que me forneceu, que sem eles eu não conseguiria elaborar esta tese.

Aos meus pais, por me inculcarem o amor e dedicação pelos grandes princípios que comandam a vida e estímulo pela determinação de realização académica e profissional.

Ao meu irmão e cunhada por partilharem comigo os seus conhecimentos e por me ajudarem a ganhar vontade de querer sempre aprender mais.

Aos meus amigos, que sempre estiveram por perto, pelas sugestões de ajuda à resolução dos diversos problemas que me ia deparando ao longo do curso e apoio na superação de diversos obstáculos.

Gilberto Marques da Silva



# Índice

<b>Resumo .....</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>v</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice.....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de tabelas .....</b>	<b>xv</b>
<b>Abreviaturas e Símbolos .....</b>	<b>xvi</b>
<b>1     Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1   Enquadramento .....	1
1.2   Motivação .....	3
1.3   Objectivos .....	4
1.4   Estrutura .....	4
1.5   Caracterização dos casos de estudo .....	5
<b>2     Estado da arte .....</b>	<b>7</b>
2.1   Protocolos de Medição e Verificação .....	7
2.2   Medição & Verificação.....	8
2.2.1 Abordagem geral à M&V .....	8
2.2.2 Período de consumo de referência .....	11
2.2.3 Período de reporte .....	11
2.2.4 Definição do IPMVP .....	11
2.2.5 Princípios fundamentais da M&V .....	12
2.2.6 Fronteiras de Medição .....	12
2.2.7 Plano de M&V .....	13
2.2.8 Verificação do potencial para gerar poupança .....	13
2.2.9 Determinação das poupanças .....	14
2.3   Opções do IPMVP .....	14
2.3.1 Visão geral das opções do IPMVP .....	14
2.3.2 Opções A e B: medição isolada da MRE .....	14
2.3.3 Opção A: medição dos parâmetros chave .....	15
2.3.4 Onde se aplica melhor a opção A .....	16

2.3.5	Opção B: medição de todos os parâmetros .....	16
2.3.6	Onde se aplica melhor a opção B .....	17
2.3.7	Porque escolher a opção A ou B.....	17
2.3.8	Opção C: Toda a instalação .....	17
2.3.9	Onde se aplica melhor a opção C .....	18
2.3.10	Opção D: simulação calibrada .....	18
2.3.11	Onde se aplica melhor a opção D .....	19
2.4	Técnicas de modelização matemática.....	19
2.4.1	Clustering .....	19
2.4.2	Simulações computadorizadas.....	20
2.5	Plano de Medição e Verificação .....	20
2.5.1	Abordagem geral aos planos de M&V.....	20
2.5.2	Descrição dos pontos a abordar num plano geral de M&V.....	22
2.5.3	Pontos adicionais a abordar num plano de M&V, para a opção A e D .....	24
2.6	Contratos de Desempenho Energético.....	25
2.7	Incerteza.....	26
2.7.1	Introdução .....	26
2.7.2	Incerteza na M&V .....	26
2.7.3	Comportamento humano .....	27
<b>3</b>	<b>Contributos para metodologia de M&amp;V.....</b>	<b>29</b>
3.1	Sistema de apoio à identificação de diagramas de referência e identificação de relações com variáveis explicadoras.....	29
3.2	Ferramentas de apoio à Medição e Verificação.....	33
3.2.1	Técnicas de Clustering.....	33
3.3	Modelos de incertezas.....	35
3.3.1	Introdução .....	35
3.3.2	Modelo baseado na distribuição t de Student .....	36
3.3.3	Modelo baseado numa distribuição normal .....	38
3.3.4	Modelo baseado em Quantis Amostrais .....	40
<b>4</b>	<b>Exemplos de casos de M&amp;V - Período do consumo de referência.....</b>	<b>43</b>
4.1	Descrição .....	43
4.2	Opção A do IPMVP .....	44
4.2.1	Edifício de escritórios.....	44
4.3	Opção B do IPMVP .....	50
4.3.1	Cafetaria - Iluminação .....	50
4.3.2	Cafetaria - AVAC .....	57
4.3.3	Edifício de escritórios.....	60
4.4	Opção C do IPMVP .....	63
4.4.1	Edifício de escritórios.....	63
<b>5</b>	<b>Exemplos de casos de M&amp;V - Período de reporte .....</b>	<b>65</b>
5.1	Descrição .....	65
5.2	Medida de Racionalização Energética .....	66
<b>6</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>69</b>
	<b>Referências .....</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>77</b>
7.1	Planos de Medição e Verificação (Cafetaria - Iluminação).....	77



# Lista de figuras

Figura 1.1 - Esquema de ligações dos aparelhos de medição no edifício de escritórios. ....	6
Figura 2.1 - Poupança de energia ou desempenho energético depende do uso e eficiência [23]. ....	9
Figura 2.2 - Exemplo simplificado de histórico de energia [25]. ....	10
Figura 2.3 - Exemplo de histórico de energia [25]. ....	10
Figura 2.4 - Medição isolada da MRE (opções A e B) contra Métodos de M&V de toda a instalação (opções C e D) [23]. ....	13
Figura 2.5 - Exemplo de um <i>Clustering</i> de cinco grupos. ....	20
Figura 2.6 - Distribuição dos custos e proveitos associados a um EPC [40]. ....	26
Figura 2.7 - A lei dos proveitos decrescentes da M&V [23]. ....	27
Figura 3.1 - Correlação entre radiação solar média e Potência activa do sistema de iluminação da cafetaria, valores de cada 15 minutos. ....	30
Figura 3.2 - Correlação entre radiação solar média e Potência activa do sistema de iluminação da cafetaria, valores de cada dia. ....	30
Figura 3.3 - Gráfico da potência activa trifásica medida, onde é possível identificar-se diagramas correspondentes a dias úteis, sábados, domingos e feriados. ....	31
Figura 3.4 - Processo de selecção de técnicas de definição de diagramas de referência. ....	32
Figura 3.5 - Exemplo de pontos centrais de grupos de 3, 4, 5 e 6 elementos. ....	34
Figura 3.6 - Relação entre variáveis independentes e elementos de cada grupo. ....	35
Figura 3.7 - Fluxograma que permite a escolha das várias abordagens ao cálculo de incertezas. ....	36
Figura 3.8 - Exemplo da forma como o nível de incertezas pode variar ao longo de um diagrama. ....	37
Figura 3.9 - Exemplo de um histograma dos erros. ....	38
Figura 3.10 - Exemplo do resultado da optimização de uma função distribuição de probabilidade a um conjunto de erros. ....	39
Figura 3.11 - Gráfico que exemplifica de que forma se encontra o intervalo de erro para um intervalo de confiança de 90% (função não cumulativa). ....	40

Figura 3.12 - Gráfico que exemplifica de que forma se encontra o intervalo de erro para um intervalo de confiança de 90% (função cumulativa).....	40
Figura 3.13 - Exemplo de histograma de erros não explicável por uma distribuição normal. .	41
Figura 4.1 - Esquematização de funcionamento dos Modelos Matemáticos, e sua relação com os aparelhos de medição, para o período de consumo de referência. ....	45
Figura 4.2 - Exemplo da correlação entre variáveis, neste caso do consumo geral do piso 1 com o consumo de todo o edifício. ....	45
Figura 4.3 - Exemplo do resultado de estimativa obtido através de regressão linear, para o consumo geral do piso 2. ....	46
Figura 4.4 - Resultado da optimização de uma função distribuição de probabilidade ao conjunto de erros associado ao modelo do consumo do Piso 0. ....	47
Figura 4.5 - Resultado de optimização de uma função distribuição de probabilidade ao conjunto de erros associado ao modelo do consumo do Piso 1. ....	47
Figura 4.6 - Esquema de ligações dos aparelhos de medição para o período de reporte, onde são determinados os ajustes aos modelos de acordo com os valores das variáveis independentes. ....	49
Figura 4.7 - Diagramas diários (dias úteis). ....	50
Figura 4.8 - Correlação da radiação média com a potência (valores de cada 15 minutos). ....	51
Figura 4.9 - Correlação do somatório da radiação diária com a Energia consumida num dia.....	51
Figura 4.10 - Pontos centrais dos quatro grupos. ....	52
Figura 4.11 - Relação entre o máximo de radiação e a radiação média de cada dia. ....	53
Figura 4.12 - Modelo matemático para o período de consumo de referência.....	55
Figura 4.13 - Histograma dos erros obtidos comparados com a função Gaussiana que melhor consegue explicar o problema.....	56
Figura 4.14 - Correlação da temperatura com a potência activa trifásica. ....	58
Figura 4.15 - Valores de potência registados, nos dias úteis.....	58
Figura 4.16 - Gráfico com os valores medidos de potência activa e com o modelo matemático. ....	59
Figura 4.17 - Modelo matemático e incerteza para um intervalo de confiança de 95%. ....	59
Figura 4.18 - Modelo matemático e incerteza para um intervalo de confiança de 90%. ....	60
Figura 4.19 - Modelo matemático e incerteza para um intervalo de confiança de 50%. ....	60
Figura 4.20 - Exemplo do resultado obtido através do modelo de diagramas médios, para o consumo geral do piso 4. ....	61
Figura 4.21 - Exemplo do resultado obtido através do modelo de diagramas médios, para o consumo geral do sistema AVAC. ....	61

Figura 4.22 - Valores de incerteza calculados para cada 15 minutos dos três diagramas determinados, para a série de dados extraída do medidor do consumo geral do piso 4.....	62
Figura 4.23 - Valores de incerteza calculados para cada 15 minutos dos três diagramas determinados, para a série de dados extraída do medidor do consumo geral do sistema AVAC. ....	62
Figura 4.24 - Gráfico com o resultado obtido através do modelo de diagramas médios, para o consumo geral do edifício.....	63
Figura 4.25 - Incertezas para os diferentes diagramas, com um intervalo de confiança de 90%.....	63
Figura 5.1 - Exemplo ilustrativo dos resultados obtidos na medida de racionalização energética. ....	67
Figura 5.2 - Gráfico com a quantidade de energia poupada após aplicação da MRE. ....	67
Figura 6.1 - Exemplo ilustrativo das incertezas calculadas e risco assumido por parte da ESCO. ....	70
Figura 6.2 - Exemplo de uma anomalia registada por uma unidade de medição.....	71



## Lista de tabelas

Tabela 1.1 - Previsão da União Europeia para a redução de consumo energético em vários sectores [9].....	1
Tabela 3.1 - Exemplo da matriz das pertenças (matriz U) para nove diagramas diários e quatro elementos de <i>Cluster</i> .....	34
Tabela 3.2 - Exemplo de um quantil determinado para o sistema de iluminação da cafeteria. ....	41
Tabela 4.1 - Exemplo de intervalos de erro para vários intervalos de confiança, resultados do modelo matemático do consumo do Piso 2. ....	48
Tabela 4.2 - Diagramas tipo, obtidos a partir dos pontos centrais dos quatro grupos definidos. ....	54
Tabela 4.3 - Resultados da aplicação da técnica de modelização de erros, clustering com um passo de 5%. ....	56
Tabela 4.4 - Tabela com os intervalos de erro para intervalos de confiança entre 95% e 55% com um passo de 5%.....	57

# Abreviaturas e Símbolos

## Lista de abreviaturas

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
ESCO	Empresa de serviços energéticos
ECM	<i>Energy Conservation Measure</i>
EPC	<i>Energy Performance Contracting</i>
FEMP	<i>Federal Energy Management Protocol</i>
IPMVP	Protocolo Internacional de Medição e Verificação
MRE	Medida de racionalização de energia
M&V	Medição e verificação
NEMPV	<i>North American energy Measurement and Verification Protocol</i>
O&M	Operação e Manutenção
RMSE	Erro médio quadrático ( <i>root mean squared error</i> )

## Lista de símbolos

W	Watt
kWh	Quilowatt-hora
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
S <sup>2</sup>	Variância
$\bar{Y}$	Valor médio da energia consumida
$Y_i$	Energia consumida a cada dia
n	Número de dias
EP	Erro padrão
S	Desvio padrão
t	Parâmetro da distribuição t de <i>Student</i>

## Definições

<b>Contrato de desempenho energético</b>	Um contrato entre duas ou mais partes, onde o pagamento se baseia na obtenção de resultados específicos, tal como a redução nos custos de <i>energia</i> ou o reembolso do investimento dentro de um determinado período [1]. O contratante assume os custos de implementação das medidas de racionalização de energia (MREs) e este é pago a partir das poupanças de energia e água resultantes dessas MREs [2].
<b>Período de consumo de referência</b>	O período de consumo de referência deve ser determinado para representar todos os modos de funcionamento da instalação. Este período deve cobrir um ciclo de funcionamento completo desde o consumo máximo de energia ao mínimo [1].
<b>Empresas de serviços energéticos (ESCO)</b>	Uma empresa que fornece serviços de concepção e construção de <i>MREs</i> sob um <i>contrato de desempenho energético</i> [1].
<b>Fronteira de medição</b>	Limite imaginário estabelecido à volta do equipamento e/ou sistemas para separar aqueles que são relevantes para a determinação da <i>poupança</i> daqueles que não o são. Todos os consumos de <i>energia</i> do equipamento ou sistemas dentro da fronteira de medição devem ser medidos ou estimados, quer os consumos de <i>energia</i> estejam ou não dentro do limite [1].
<b>Instalação</b>	Um edifício ou local industrial contendo vários sistemas que utilizam <i>energia</i> . Uma ala ou secção de uma <i>instalação</i> maior pode ser tratada como uma <i>instalação</i> por si só se tiver contadores que meçam separadamente toda a sua <i>energia</i> [1].
<b>Intervalo de confiança</b>	A probabilidade de qualquer valor medido ficar dentro de uma gama estabelecida de <i>precisão</i> [1].
<b>Medição e Verificação (M&amp;V)</b>	Processo de utilização de medições para determinar correctamente a <i>poupança</i> real dentro de uma instalação individual por um programa de gestão de <i>energia</i> . A <i>poupança</i> não pode ser medida directamente, uma vez que representa a ausência do consumo de <i>energia</i> . Em vez disso, a <i>poupança</i> é determinada, comparado o consumo medido antes

e depois da implementação de um projecto, fazendo os ajustes adequados para as alterações nas condições [1].

**Medida de racionalização de energia (MRE)**

Uma actividade ou conjunto de actividades concebidos para aumentar a eficiência *energética* de uma *instalação*, sistema ou peça de equipamento. As MREs podem também conservar *energia* sem mudar a eficiência. Várias MREs podem ser implantadas numa *instalação* ao mesmo tempo, cada uma com um alcance diferente. Uma MRE pode implicar uma ou mais: alterações físicas ao equipamento da *instalação*, revisões dos procedimentos de funcionamento e de manutenção, alterações de software ou novos meios de formação ou gestão dos utilizadores do espaço ou operações e do pessoal da manutenção. Uma MRE pode ser aplicada como uma alteração a um sistema ou *instalação* já existentes ou como uma modificação a um conceito antes da construção de um novo sistema ou *instalação* [1].

**Métodos de engenharia**

Os métodos de engenharia são usados para desenvolver estimativas das poupanças de energia baseadas em informações técnicas dos fabricantes dos equipamentos em conjunto com características de funcionamento do equipamento. As duas abordagens básicas para desenvolvimento das estimativas de engenharia são algoritmos de engenharia e métodos de simulação de engenharia [3].

**Modelo estatístico multivariável**

Na avaliação de um projecto, pode ser necessário o desenvolvimento de modelos estatísticos para isolar melhor os impactos de um projecto de eficiência energética a partir de outros factores que também influenciam a utilização de energia. A análise de regressões pode ajudar a corrigir problemas na recolha de dados e de amostragem [3].

**Modelo de simulação**

Conjunto de algoritmos que calcula o consumo de *energia* de uma instalação, baseado em equações de engenharia e parâmetros de utilização definidos [1].

<b>Monitorização a curto prazo</b>	A monitorização a curto prazo refere-se à recolha de dados realizada para medir características físicas específicas ou o consumo energético quer instantaneamente ou durante um curto período de tempo. Este tipo de monitorização é realizado para apoiar actividades de avaliações tais como estudos de engenharia e análise estatística. A monitorização a curto prazo é uma ferramenta útil para estimar a poupança de energia quando a eficiência do equipamento é melhorada mas o horário de funcionamento permanece fixo [3].
<b>Período de reporte</b>	Período de tempo que se segue à implementação de uma <i>MRE</i> quando os relatórios de <i>poupança</i> aderem ao IPMVP. Este período pode ser tão curto quanto o tempo de uma medição instantânea de uma quantidade constante; suficientemente longo para reflectir todos os modos de funcionamento normal de um sistema ou <i>instalação</i> com operações variáveis; a duração do período de reembolso financeiro de um investimento; a duração de um período de medição do desempenho energético sob um <i>contrato de desempenho energético</i> ; ou indefinido [1].
<b>Período do consumo de referência</b>	O período de tempo escolhido para representar o funcionamento da <i>instalação</i> ou sistema antes da implementação de uma <i>MRE</i> . Este período pode ser tão curto quanto o tempo necessário para uma medição instantânea de uma quantidade <i>constante</i> ou suficientemente longo para reflectir um <i>ciclo</i> de funcionamento completo de um sistema ou <i>instalação</i> com funcionamentos variáveis [1].



# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento

Eficiência energética pode ser definida como a optimização que podemos fazer no consumo de energia [4]. A eficiência energética pressupõe a implementação de estratégias e medidas para combater o desperdício de energia ao longo do processo de transformação: desde que a energia é transformada e, mais tarde, quando é utilizada [5].

Portugal é um país com escassos recursos energéticos próprios, nomeadamente, aqueles que asseguram a generalidade das necessidades energéticas da maioria dos países desenvolvidos [6].

Investir em eficiência energética é uma oportunidade para se conseguir, ao mesmo tempo, grandes benefícios económicos e ambientais. Uma parte importante da procura crescente de serviços energéticos pode ser suprida por medidas de eficiência com custos e investimentos menores que a alternativa expansão das infra-estruturas de energia [7].

As poupanças são a redução na utilização de energia, não se pode ver o que não se usa, não se pode medir o que não se consome, não se pode medir as poupanças [8]. A comissão Europeia prevê que as poupanças de energia mais significativas sucederão nos sectores indicados na Tabela 1.1 [9].

**Tabela 1.1** - Previsão da União Europeia para a redução de consumo energético em vários sectores [9].

Sector	Potencial de redução
Edifícios residenciais	27%
Edifícios para uso comercial	30%
Indústrias transformadoras	25%
Sector dos transportes	26%

A poupança de energia não pode ser medida directamente, uma vez que a poupança representa a ausência do consumo de energia. Em vez disso, a poupança é determinada comparando consumo medido ou consumo antes e depois da implementação de um programa, fazendo os ajustes adequados às alterações nas condições do período de referência [1].

No entanto, os proprietários das instalações enfrentam diversas barreiras à racionalização energética<sup>1</sup> que muitas vezes impedem a realização dos ganhos potenciais. Em muitas destas situações, prestadores de serviços de eficiência energética<sup>2</sup> podem fazer uma contribuição decisiva à implementação efectiva das medidas de eficiência energética [7].

O objectivo do Plano de Acção para a Eficiência Energética para a área da indústria é a promoção do aumento da eficiência energética por via da modificação dos processos de fabrico, da introdução de novas tecnologias e mudança de comportamentos [10].

A área da indústria compreende um programa designado por Sistema de Eficiência Energética na Indústria, que inclui a substituição do Regulamento de Gestão de Consumo de Energia por um novo regulamento, denominado Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) [10].

Desta forma, em alguns países industrializados começou a surgir um claro sector de prestação de serviços de conservação de energia. O crescimento trouxe inovações importantes na comercialização dos serviços, como financiamento e nos tipos de contrato. Uma parte fundamental desta evolução foi o aprimoramento de contratos de desempenho para medidas de eficiência energética. Nestes o prestador do serviço garante a realização de um determinado nível de economia e é remunerado pelo fluxo de ganhos obtidos do projecto [7].

A M&V (Medição e Verificação) é um conjunto de procedimentos que apuram a economia obtida, é a base para a remuneração do contrato de performance [11].

A determinação exacta da *poupança de energia* fornece aos proprietários e gestores da instalação informação valiosa acerca das suas *medidas de racionalização de energia (MREs)* [12]. Esta informação ajuda a ajustar a concepção da MRE ou as operações para melhorar a poupança, assegurar uma maior duração de poupança ao longo do tempo e menos variações na poupança [13].

Na determinação das normas para M&V há um conjunto de actividades ditas convencionais e outro de não convencionais. Entre as convencionais estão a aprovação do projecto, a verificação da instalação completa e a aprovação adequada dos novos equipamentos e sistemas especificados no contrato. Estas actividades são normais para quaisquer projectos de engenharia e da instalação de equipamentos.

No que diz respeito as actividades não convencionais tem-se a verificação da precisão das condições pré contratuais como especificadas no contrato entre o comprador e o vendedor e a verificação do nível de economia de energia alcançado e o custo da energia economizada que ocorre durante a vigência do contrato.

---

<sup>1</sup> As barreiras são, entre outros, os investimentos avultados, as incertezas nas poupanças e imperfeições do mercado.

<sup>2</sup> Estas empresas são chamadas de ESCO que significa *Energy Service Companies*, empresas de Serviços de Conservação de energia.



A questão essencial recai sobre as actividades não convencionais. Estas são estreitamente ligadas à preparação e execução de contratos de desempenho energético (EPC's), que são o contexto mais exigente para realizar um plano de M&V. No entanto um plano de M&V pode ser útil em outras situações, adaptando-se os procedimentos. Por exemplo, quando uma indústria executa internamente medidas de conservação energética e deseja saber quais os resultados do investimento [7].

## 1.2 Motivação

Em particular, o uso eficiente de energia e electricidade é uma das mais importantes formas de efectivamente se atingir a sustentabilidade da União Europeia e os objectivos de políticas ambientais e energéticas [14].

Quando as empresas investem em eficiência energética, elas naturalmente desejam saber quanto economizam e por quanto tempo a economia permanecerá. Entretanto estimar as economias resultantes de uma MRE (medida de racionalização de energia) é um desafio, em especial para os fins de um contrato. As economias tratam-se da ausência do uso de energia em relação ao padrão antes da implementação da medida. Necessita simultaneamente de medição e de metodologia reproduzível aceite pelas partes envolvidas, como o proprietário da instalação, a ESCO e por vezes um financiador [7].

Um projecto de eficiência energética pode envolver muitas partes, mas apenas uma ESCO é que tem uma relação contratual e total responsabilidade para o cliente [15].

O sucesso dos projectos de eficiência energética pode ser comprometido se o comprador e o vendedor não concordarem num plano adequado de medições e verificação dos ganhos. Para facilitar o consenso sobre os procedimentos é muito útil ter um Protocolo de Medição e Verificação (M&V).

Um protocolo apresenta um guia imparcial dos pontos que devem ser considerados e um conjunto de procedimentos e metodologias para quantificar os ganhos alcançados pelas medidas de eficiência contratadas. Orienta as partes sobre factores decisivos na escolha da metodologia mais adequada, gestão e alocação de riscos, investigação e resolução de discórdias e outros aspectos essenciais na relação entre o comprador e vendedor que são indispensáveis à determinação dos resultados alcançados [7].

Investir em eficiência energética resulta também em mais emprego, menos dependência energética e menores impactos ambientais. Este conjunto de características traz benefícios ao país como um todo [7]. O plano de acção para a eficiência energética inclui vários tipos de medidas para facilitar os investimentos destinados a aumentar a eficiência energética [9].

## 1.3 Objectivos

O primeiro objectivo da M&V é verificar os ganhos, isto deve-se inserir num objectivo mais amplo que é a gestão do uso da energia. Central à gestão energética é a monitorização, que muitas vezes vem associada a sistemas de maior controlo de processo.

A monitorização e o controlo podem por si só trazer grandes ganhos energéticos e muitas vezes são componentes de um projecto de eficiência energética. Ao mesmo tempo, um investimento em monitorização pode aumentar a precisão da verificação sem acarretar custos maiores.

O ponto de equilíbrio entre precisão e custo é um dos principais factores na escolha das metodologias de M&V. Assim, apesar de ter objectivos operacionais distintos (e muitas vezes contabilidade distinta no projecto), a verificação e a monitorização devem ser vistos de forma integrada no desenvolvimento de projectos [7].

## 1.4 Estrutura

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos distintos, sendo a introdução o primeiro desses capítulos. No segundo capítulo estão descritos aspectos relacionados com os protocolos M&V tais como questões intrínsecas da M&V, opções de metodologias a seguir, técnicas matemáticas de modelização (de modelos matemáticos e de incertezas). Por fim estão expostas as ligações da M&V aos contratos de desempenho energético.

No terceiro capítulo são apresentados os contributos para o desenvolvimento e aperfeiçoamento das metodologias de M&V. Partindo-se da experiência alcançada no desenvolvimento de casos de M&V, criou-se um sistema de apoio e associação de novas ferramentas de apoio à medição e verificação do desempenho energético. Tendo em conta que o cálculo de incertezas é bastante importante para o cálculo das poupanças alcançadas, também se desenvolveu um sistema de apoio à decisão da melhor metodologia de cálculo a usar e é exemplificado o funcionamento de cada uma.

No quarto capítulo são apresentados os exemplos de casos de M&V mas apenas a parte referente ao período de consumo de referência. É de salientar que se tentou explorar o máximo possível de hipóteses de abordagens do IPMVP (*International Protocol of Measure and Verification*), estando este capítulo dividido por opções e depois por casos práticos. Em cada secção é demonstrada a forma como se chegou aos modelos matemáticos e aos valores de incertezas.

Para complementar o capítulo anterior, o quinto capítulo demonstra os resultados alcançados em dois exemplos de casos de M&V mas desta vez vocacionado para a verificação dos níveis de poupança energética alcançada, para o período de reporte. Também se mostra a abordagem à problemática das incertezas.

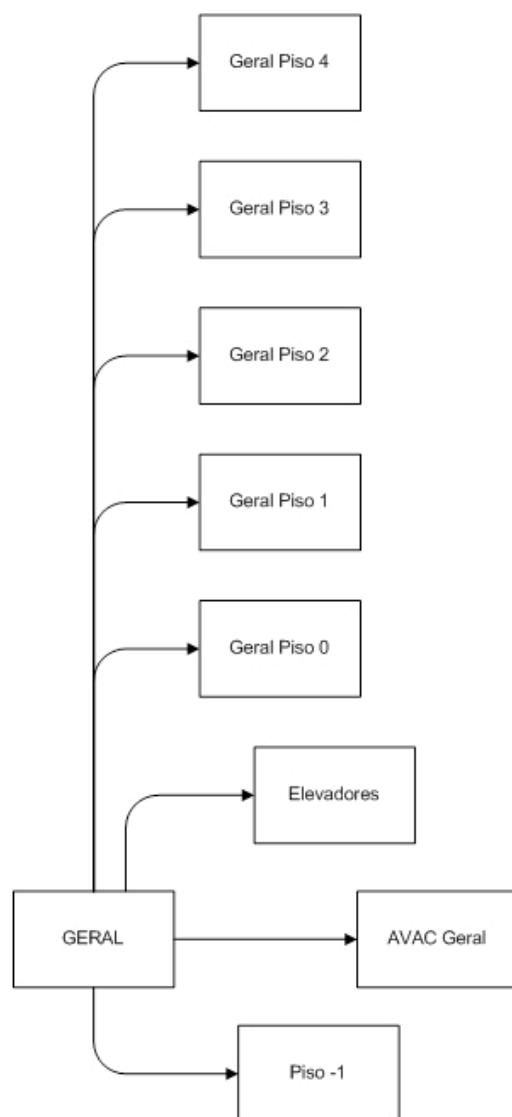
Para finalizar, na última parte (Capítulo 6), são apresentadas as diversas conclusões obtidas na elaboração desta dissertação e são identificadas algumas perspectivas de futuros desenvolvimentos. Como anexos tem-se um exemplo de um plano de Medição e Verificação criado com base num dos casos explorado nas secções 4.3.1 e 5.2.

## 1.5 Caracterização dos casos de estudo

No âmbito desta dissertação, foram fornecidos dados de consumo de energia de dois edifícios distintos: um deles é de serviços de refeições (cafetaria e restaurante) e um edifício de serviços (escritórios). Neste último edifício, onde estavam instalados vários aparelhos de medição, foi permitido que se explorasse várias opções de M&V, alterando a configuração dos sistemas de medição. Os dados foram fornecidos, gentilmente, pela empresa SmarWatt, pelo que a confidencialidade dos mesmos está salvaguardada.

No edifício de serviço de refeições, foram instalados apenas dois aparelhos de medição, um para os sistemas de iluminação e outro para os sistemas de AVAC. Este edifício tem apenas um piso e 490 m<sup>2</sup> de área, o horário de funcionamento é das 8h as 20h, todos os dias úteis, estando encerrado aos fins-de-semana e feriados. Com os dados recebidos exploraram-se dois casos de estudo: iluminação (secção 4.3.1) e AVAC (secção 4.3.2).

No edifício de escritórios já se tinha uma grande flexibilidade de horários de ocupação, podendo-se observar a presença de utilizadores a diferentes horas, tem seis pisos, estando um aparelho de medição instalado a registar valores de gerais de energia a cada piso. Para além destes aparelhos de medição, está também inserido um medidor do consumo geral do edifício, do consumo geral do sistema AVAC e do consumo por parte dos elevadores. Como apoio à compreensão tem-se a Figura 1.1 que ilustra o esquema de ligações e dependências entre aparelhos de medição.



**Figura 1.1** - Esquema de ligações dos aparelhos de medição no edifício de escritórios.

Aproveitando esta multiplicidade de medidores instalados, exploraram-se várias hipóteses de configuração: opção A do IPMVP (secção4.2.1), B (secção4.3.3) e C (secção4.4.1).

Até à data de redacção desta dissertação, apenas foram aplicadas medidas de racionalização energética ao edifício de serviço de refeições, os sistemas de iluminação foram melhorados.

## 2 Estado da arte

### 2.1 Protocolos de Medição e Verificação

Na década de 1990, os investimentos em projectos de eficiência energética foram menos do que o esperado devido à elevada incerteza e risco associados com as futuras poupanças de energia. Esta incerteza resultou, em parte, de múltiplos e muitas vezes incoerentes protocolos de Medição e Verificação. Estas inconsistências resultaram numa multiplicidade de abordagens de engenharia para a eficiência das instalações e medição da poupança [16].

Em Portugal, ainda não se realizou nenhum grande EPC devido à complexidade que um contrato deste tipo envolve. Existe alguma actividade do tipo ESCO mas esta limita-se à simples troca de um ou outro equipamento isolado [14].

Com o crescimento das ESCO surgiram várias tentativas de normalizar as metodologias de M&V. Houve inconsistências entre as abordagens, o que levou a um esforço de harmonização em 1994. Este envolveu a cooperação entre agências do governo e especialistas nas indústrias de energia de eficiência dos Estados Unidos, do México e Canadá. Deste resultou a publicação do “*North American Energy Measurement and Verification Protocol*” - NEMPV em Março de 1996 [17]. Esta Primeira versão foi por sua vez modificada e expandida com uma participação internacional mais ampla para produzir uma primeira versão do “*International Performance Measurement and Verification Protocol*” - IPMVP, publicado em Novembro de 1997 [7], sendo a versão mais actualizada de 2007. Este define os procedimentos gerais para se alcançar, de uma forma fiável as poupanças [18]. As verificações das poupanças actuais são feitas de acordo com o plano de M&V exclusivo de cada projecto [19]. O IPMVP define quatro opções de M&V para quantificar as poupanças energéticas [20].

Um outro protocolo paralelo é o FEMP (*Federal Energy Management Protocol*), foi estabelecido em parte para reduzir os custos de energia do governo ao operar as instalações públicas com mais eficiência [21]. As directrizes do FEMP para M&V são uma parte do IPMVP destinada somente a projectos do sector público [7].

No ano de 2000, o IPMVP foi expandido para suprir as questões de qualidade ambiental

## 2.2 Medição & Verificação

### 2.2.1 Abordagem geral à M&V

A medição e Verificação é um procedimento capaz de manter um contrato de desempenho justo para todas as partes interessadas, é um processo de utilização de medidas para determinar de modo seguro a poupança real gerada pelas medidas de racionalização de energia [1]. Uma redução significativa nos custos energéticos do cliente pode ocorrer se as MRE's forem devidamente adoptadas. O período de retorno dos investimentos<sup>3</sup>, para a maioria das MRE's é inferior a dois anos [22].

Dois factores fundamentais que levam à poupança de energia são o desempenho e o uso. O desempenho descreve a quantidade de energia que é utilizada para realizar uma tarefa específica; o uso descreve a quantidade de tempo que é necessária para realizar uma tarefa, tal como o número de horas de funcionamento durante o qual uma peça de equipamento opera. No caso simples de iluminação, o desempenho é caracterizado pela energia necessária para fornecer uma determinada quantidade de luz e o uso é o horário de funcionamento por ano. Tanto o desempenho como o uso precisam de ser conhecidos para se determinar a poupança, como mostrado na Figura 2.1.[23].

---

<sup>3</sup> Período de retorno dos investimentos é o tempo decorrido entre o investimento inicial e o momento no qual o lucro líquido acumulado se iguala ao valor desse investimento.

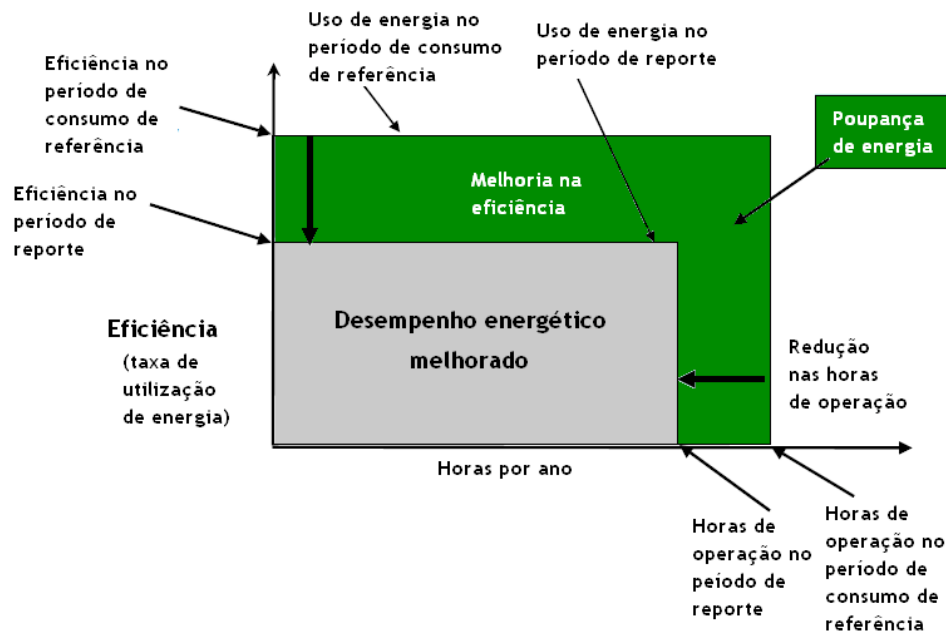


Figura 2.1 - Poupança de energia ou desempenho energético depende do uso e eficiência<sup>4</sup> [23].

As poupanças de energia da instalação são determinadas através da comparação do consumo energético antes e depois da implementação das medidas de eficiência energética. O consumo anterior é chamado de consumo de referência de energia ou *baseline* e o consumo posterior é designado por período de reporte da energia medida ou *performance period*. Uma adequada determinação das poupanças deve incluir ajustes face as mudanças que afectem a utilização de energia, mas que não são causadas pelas medidas de racionalização de energia (MRE). Tais ajustes devem ter em conta as diferenças nas condições meteorológicas e nas condições de ocupação entre o período de consumo de referência e o período de reporte. De uma forma geral, a comparação do antes e depois da MRE é feita recorrendo-se à equação geral 2.1:

$$\text{Poupança} = (\text{Consumo}_{\text{período de referência}})_{\text{Ajustado}} - (\text{Consumo}_{\text{período de Reporte}}) \quad (2.1)$$

A utilização de energia no período de consumo de referência e no período de reporte pode ser determinada usando os métodos associados com várias abordagens de M&V, denominadas de opções A, B, C e D, para fornecer técnicas adequadas para uma grande variedade de aplicações. A escolha de uma destas opções é baseada no nível de rigor requerido para a M&V para que se possa obter um nível de precisão desejado na

<sup>4</sup>Factores de desempenho indicam características de eficiência de um equipamento ou sistema.

determinação das poupanças e é dependente da complexidade da MRE, do potencial de alterações no desempenho e no valor das poupanças medidas [24].

Considerando um exemplo simples onde tem-se curva de consumo anual de energia totalmente plana, o que reflecte um consumo energético constante ao longo do tempo. Então, depois de se implementar acções de melhoria da eficiência energética, ter-se-á um menor consumo de energia, sempre constante no tempo, como mostrado na Figura 2.2 [25]:

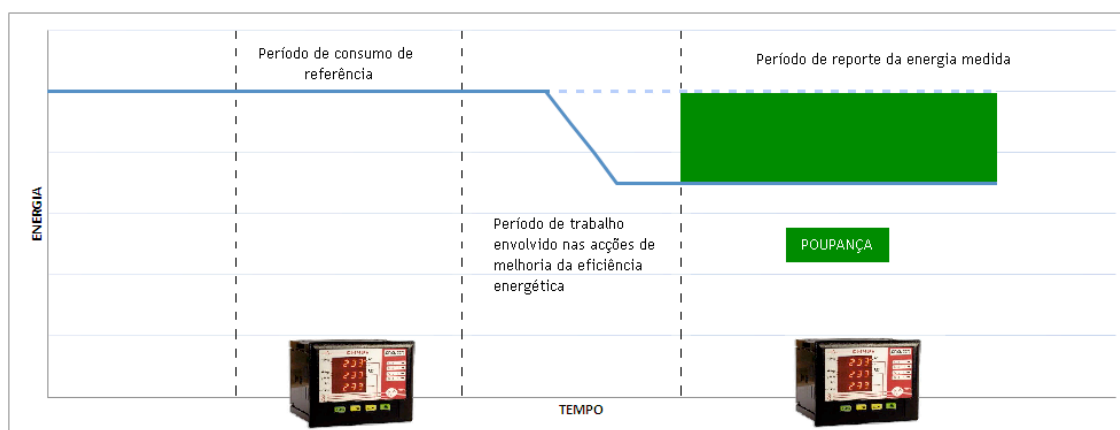


Figura 2.2 - Exemplo simplificado de histórico de energia [25].

Na realidade as curvas de consumo são bastante semelhantes ao perfil da Figura 2.3, os altos e os baixos são em geral reprodução, não exacta mas muito semelhante do período de referência [25]. Desta forma, é necessário seguir procedimentos claros de M&V (aplicados antes do período de trabalho nas acções de melhoria da eficiência energética), para se quantificar as poupanças com confiança, mesmo que as condições de exploração tenham mudado. Estes procedimentos consistem num conjunto de expressões matemáticas, verificáveis por um terceiro.

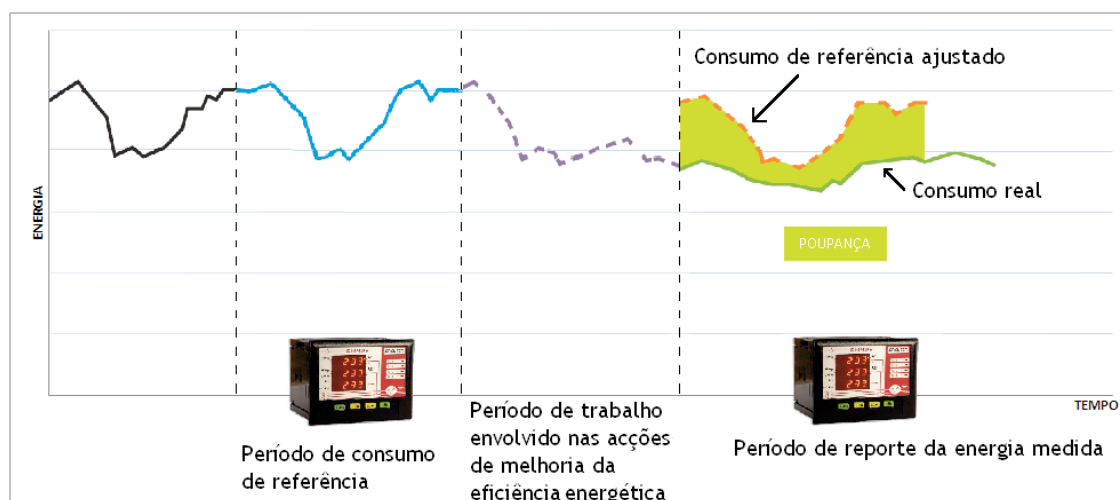


Figura 2.3 - Exemplo de histórico de energia [25].



Os resultados de vários estudos mostraram que se pode alcançar cinco a quinze por cento de *poupança* de energia através da utilização cuidadosa do armazenamento contínuo de dados [26].

Existem três principais documentos em M & V que serve cada um público diferente e objectivo. Os três grandes são os seguintes:

- **IPMVP** - Fornece uma visão geral das melhores técnicas para verificar os resultados de eficiência energética [19].
- **FEMP** - Escrito para colmatar as necessidades de um segmento de mercado mais vasto, os contratos federais de desempenho energético.
- **ASHRAE 14-2002** - Criado para abordar as questões técnicas e transaccionais dos contratos de desempenho energético [27].

### 2.2.2 Período de consumo de referência

Todos os modos de funcionamento a instalação devem estar completamente caracterizados no período de consumo de referência. Este período deve cobrir pelo menos um ciclo de funcionamento completo [1].

### 2.2.3 Período de reporte

O utilizador dos relatórios de *poupança* deve determinar a duração do *período de reporte*. O *período de reporte* deve englobar pelo menos um *ciclo* de funcionamento normal do equipamento ou *instalação*, para caracterizar completamente a eficácia da *poupança* em todos os modos de funcionamento normais [1].

A duração de qualquer *período de reporte* deve ser determinada com a devida consideração pela duração da *MRE* e a probabilidade de degradação da *poupança* originalmente obtida ao longo do tempo [1].

### 2.2.4 Definição do IPMVP

O Protocolo Internacional de Medição e Verificação do desempenho energético (IPMVP) volume I é um documento de apoio, que descreve as práticas comuns de medição, cálculo e relato de poupança obtidos por projectos de eficiência energética nas instalações do utilizador final [1].

O IPMVP (e o seu antecessor NEMVP) não é principalmente um protocolo técnico, este contempla as informações fornecidas pelo trabalho do comité da ASHRAE (*Measurement of Energy and Demand Savings*, publicado em 1998). Em contraste com o documento da ASHRAE que focaliza o aspecto tecnológico do relacionamento entre as medições e o equipamento a

ser examinado, o IPMVP discute uma variedade de tópicos de M&V na forma como eles se relacionam com os reais contratos de risco. Pela própria estrutura, os dois documentos têm sobreposição.

O IPMVP serve como referência em programas norte-americanos de classificação de novos edifícios. Estes programas propendem a premiar instalações que alcançam altos níveis de eficiência, o que deve aumentar o seu valor no mercado imobiliário [7].

### 2.2.5 Princípios fundamentais da M&V

Deve-se ter em conta todos os efeitos de um projecto para se poder reportar a poupança de energia de uma forma completa. As actividades de M&V devem usar medições para quantificar todos os efeitos significantes, podendo os restantes serem determinados. Tendo em conta que os pareceres são feitos com base em estimativas, os procedimentos de M&V devem ser concebidos para avaliar a poupança por baixo.

Os relatórios de M&V devem ser o mais preciso possível, desde que o orçamento de M&V o permita. A determinação da poupança deve medir os parâmetros de desempenho energético mais importantes ou menos conhecidos enquanto os parâmetros mais previsíveis ou menos críticos podem ser calculados. Todas as actividades de M&V devem ser clara e completamente divulgadas, fazendo com que o plano de M&V seja o mais transparente possível [1].

O processo de medição e verificação tipicamente envolve o desempenho de cinco principais passos

- Pré-construção da avaliação da M&V.
- Desenvolvimento e implementação do plano de M&V.
- Identificação do período de consumo de referência do projecto de M&V.
- Fornecer um relatório de pós-implementação.
- Proporcionar periodicamente inspecções as instalações e relatórios de M&V [28].

Se for pretendida uma orientação ampla sobre os conceitos de M&V, deve-se utilizar o IPMVP. Se por outro lado for necessária uma interpretação mais detalhada do que a do IPMVP, deve-se utilizar as orientações do FEMP M&V [27].

### 2.2.6 Fronteiras de Medição

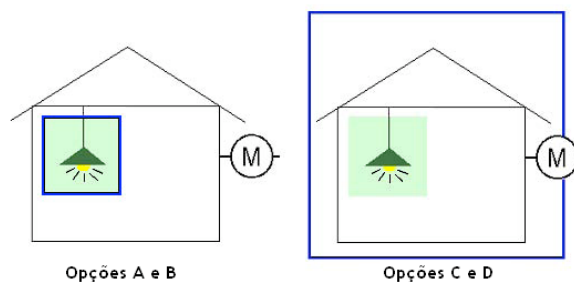
Pode-se determinar a poupança para toda a instalação ou simplesmente para parte desta, dependendo do que se quer reportar.

Se o objectivo for o de ajudar a gerir o equipamento afectado pelo programa de poupança, deve-se estabelecer uma fronteira de medição em torno desse equipamento, assim

facilmente se determinam as necessidades energéticas do equipamento. Devendo-se usar a opção A ou B do IPMVP.

Se o objectivo for o de ajudar a gerir o desempenho energético de toda a instalação, os contadores que medem o fornecimento de energia a toda a instalação podem ser usados para avaliar o desempenho energético e a poupança. Deve-se escolher a opção C para toda a instalação.

Se os dados do período do consumo de referência ou do período de reporte não são de confiança ou não estão disponíveis, devem ser usados programas de simulação para determinar os dados em falta, devendo-se usar a opção D de simulação calibrada [1].



**Figura 2.4** - Medição isolada da MRE (opções A e B) contra Métodos de M&V de toda a instalação (opções C e D) [23].

O limite da fronteira de medição pode ser tão estreito quanto o fluxo de *energia* através de um tubo ou condutor eléctrico, ou tão largo quanto o consumo total de energia de um ou muitos edifícios [1].

### 2.2.7 Plano de M&V

Um plano de M&V é um documento que define projectos específicos de medição e métodos de verificação para determinar as poupanças resultantes de projectos de desempenho energético. O plano pode incluir uma única opção que aborda todas as medidas instaladas numa única instalação ou pode incluir diversas opções de M&V para múltiplas medidas estabelecidas na instalação [24].

### 2.2.8 Verificação do potencial para gerar poupança

O potencial para a MRE instalada de geração de poupança deve ser verificado em intervalos regulares durante o período contratual. O potencial de gerar poupança pode também ser determinado confirmando:

- As condições do período de consumo de referência foram rigorosamente definidas;
- Os equipamentos/sistemas adequados foram instalados;
- Os equipamentos / sistemas estão a funcionar conforme o especificado;

- Os equipamentos/sistemas têm o potencial para gerar as poupanças previstas [24].

### 2.2.9 Determinação das poupanças

Após a MRE ou o sistema instalados, as poupanças de energia são determinadas de uma só vez, continuamente ou em intervalos regulares tal como acordado pela ESCO e pelo cliente no plano de M&V.

A utilização de energia no período de consumo base, no período de reporte e de energia poupada pode ser determinada utilizando uma ou mais das seguintes técnicas de M&V:

- Cálculos de engenharia.
- Medição e monitorização.
- Facturas da empresa do sector energético ou do fornecedor de combustível.
- Simulações computacionais [24].

A abordagem ao cálculo das poupanças geralmente é dependente da opção de M&V e método escolhido para a medida. Em alguns casos, um combinado de opções de M&V é adequada para a medida. A título de exemplo, para um edifício com várias medidas, uma combinação da opção A e B pode ser usada para diferentes medições.

## 2.3 Opções do IPMVP

### 2.3.1 Visão geral das opções do IPMVP

Este documento contém orientações de medição e verificação agrupadas em quatro categorias (opção A, B, C e D), as opções são abordagens genéricas de M&V para projectos de energia. As quatro opções fornecem uma gama de abordagens para determinar a poupança de energia com diferentes níveis de incerteza, custo e metodologia. Uma determinada opção é escolhida com base no projecto e as características de cada contrato de desempenho energético [24].

A escolha entre as opções implica muitas considerações incluindo o local da fronteira de medição. Se for decidido determinar a poupança ao nível da instalação, a opção C ou D podem ser as ideais, por outro lado, se apenas é de ter em consideração o desempenho energético da MRE, uma técnica de medição isolada da MRE pode ser mais adequada [1].

### 2.3.2 Opções A e B: medição isolada da MRE

A medição isolada das alterações permite o estreitamento da fronteira de medição (ver secção 2.2.6) de modo a reduzir o esforço requerido para monitorizar variáveis

independentes e factores estáticos, quando as medidas afectam apenas uma parte da instalação [1].

São apresentadas duas opções para isolar o consumo de energia do equipamento afectado por uma MRE, do consumo de energia do resto das instalações, A e B, relacionados com as acções de M&V de melhoria de eficiência energética cujo perímetro está isolado e a influência de sistemas fora da fronteira de medição podem ser negligenciados [25].

Limites mais pequenos do que toda a instalação, requerem habitualmente aparelhos de medição adicionais na fronteira de medição. Fronteiras de medição mais restritivas também introduzem a possibilidade de fuga através de efeitos interactivos não medidos [1].

A medição isolada da MRE requer habitualmente a adição de contadores especiais, quer seja a curto prazo ou numa base permanente. Estes contadores podem ser instalados durante uma auditoria da energia para ajudar a caracterizar o consumo de energia antes da concepção da MRE. Ou os contadores podem ser instalados para medir o desempenho energético do consumo de referência para um Plano de M&V. Pode-se medir a temperatura, a humidade, o fluxo, a pressão, o tempo de funcionamento do equipamento, a energia eléctrica ou térmica, por exemplo, na fronteira de medição (Ver 2.2.6) [1].

### 2.3.3 Opção A: medição dos parâmetros chave

Na opção A são apenas medidos os parâmetros chave (p. ex. potência da iluminação ou eficiência de um motor) são medidos instantaneamente ou a curto prazo. Os factores operacionais (p. ex. horas de operação da iluminação ou tempo de utilização de um motor) são estipulados baseados nos dados históricos ou nas medições a curto prazo [3].

Quando um parâmetro é sabido (p. ex. as horas de utilização), é constante e não se espera que venha a ser influenciado pela MRE, então pode-se considerar que a sua medição durante o período de reporte é suficiente. A medição de um parâmetro constante no período de reporte pode também ser considerada uma medição do seu valor do consumo de referência.

Sempre que um parâmetro conhecido por variar independentemente, não for medido na instalação durante os períodos de consumo de referência e de reporte, o parâmetro deve ser tratado como estimativa [1].

As poupanças podem ser calculadas através de métodos de engenharia ou monitorização a curto prazo [3]. Cálculos de engenharia ou modelação matemática podem ser usados para avaliar a importância dos erros na estimativa de qualquer parâmetro na poupança reportada [1].

O custo de estimar um parâmetro é muitas vezes significativamente menor do que o custo da medição, fazendo com que a opção A possa ser menos dispendiosa do que as outras opções. No entanto, em algumas situações onde a estimativa é a única possibilidade, uma boa

estimativa pode ser mais dispendiosa do que se fosse possível a medição directa. A planificação dos custos para a opção A deve ter em conta a análise, estimativa, instalação dos aparelhos de medição e o custo para ler e registar os dados [1].

Estima-se um custo inicial<sup>5</sup> entre 0,5 e 3% e um custo operacional anual<sup>6</sup> entre 0,1 e 0,5% [3].

#### 2.3.4 Onde se aplica melhor a opção A

Para além das melhores aplicações de isolamento da MRE a opção A é melhor aplicada onde:

- A incerteza criada pela estimativa é aceitável.
- A eficácia contínua da MRE pode ser avaliada por uma simples inspecção de rotina dos parâmetros chave.
- Nos casos onde a medição (opção B) ou simulação (opção D) são mais dispendiosos que a estimativa [1].

#### 2.3.5 Opção B: medição de todos os parâmetros

A opção B é destinada as medidas de racionalização de energia com um perfil de carga variável. Tanto os parâmetros chave como os factores operacionais são medidos em curto prazo, continuamente em todo o período de vigência do contrato ao nível do equipamento ou do sistema [3]. Requer a medição de todas as quantidades de energia ou de todos os parâmetros necessários para calcular a energia [1].

A poupança é determinada pela medição no terreno do consumo de energia do sistema afectado pela MRE. A frequência de medição vai desde o curto prazo a contínua, dependendo das variações esperadas na poupança e da duração do período de reporte [1].

Espera-se um custo inicial entre 2 e 8% e um custo operacional anual entre 0,5 e 3% [3].

---

<sup>5</sup> Os custos iniciais de M&V incluem instalação e comissionamento dos aparelhos de medição. Em novas construções, isto é a percentagem da diferença de custos entre os equipamentos do período de consumo de referência e o equipamento melhorado.

<sup>6</sup> O custo operacional anual inclui relatórios, aquisição de dados e manutenção dos aparelhos de medição durante o período de vigência do contrato.

### 2.3.6 Onde se aplica melhor a opção B

Para além dos métodos de medição isolada de MRE mencionados acima, a opção B é melhor aplicada onde:

- Os contadores acrescentados para fins de isolamento serão empregues para outros fins (p. ex. facturação de um arrendatário, informação operacional).
- A *poupança* ou as operações dentro da *fronteira de medição* são variáveis.
- A simulação (opção D) é mais dispendiosa do que a medição de todos os parâmetros [1].

### 2.3.7 Porque escolher a opção A ou B

A poupança gerada pela maioria dos tipos de MREs pode ser determinada com a opção B. no entanto, o grau de dificuldade e os custos aumentam com a complexidade da medição. Os métodos da opção B são geralmente mais difíceis e dispendiosos que os da opção A. Todavia a opção B produzirá resultados mais precisos onde as cargas e/ou os padrões de poupança são variáveis. Estes custos adicionais podem ser justificáveis se um promotor de contratos for responsável por todos os factores que influenciem a poupança de energia [1].

### 2.3.8 Opção C: Toda a instalação

A Opção C destina-se a projectos onde a poupança esperada é grande comparada com as variações de energia aleatórias ou inexplicáveis que ocorrem ao nível de toda a instalação [1]. É um método destinado a medições e verificações a todo o edifício onde os sistemas de energia são interactivos (p. ex. sistema eficiente de iluminação que reduz a carga dos sistemas de arrefecimento) [3], implica a utilização de contadores da empresa do sector energético, contadores de toda a instalação, ou sub-contadores para avaliar o desempenho energético de toda a instalação [1].

A poupança é determinada pela medição do consumo de energia ao nível de toda a instalação, a fronteira de medição inclui ou toda a instalação ou uma grande parte desta. Medições contínuas do consumo de energia de toda a instalação são efectuadas durante o período de reporte [1].

Cálculos de engenharia baseados em análises estatísticas de toda a instalação usando técnicas de simples comparação até análise de regressões multivariáveis [3]. Normalmente, na análise é realizada uma correlação com a utilização de energia e ajuste por parte de variáveis independentes, tais como condições meteorológicas, mas comparações simples também podem ser usadas [23].

Estima-se um custo inicial entre 0,5 e 3% se for considerada uma análise baseada nas facturas da empresa de serviços energéticos, um custo inicial entre 2 e 8% se for consideradas medições horárias e um custo operacional anual entre 0,5 e 3% [3].

A modelação matemática pode avaliar variáveis independentes de estas forem cíclicas. A análise de regressão e outras formas de modelação matemática podem determinar o número de variáveis independentes a considerar nos dados do consumo de referência. As variáveis independentes mais comuns são o clima, o volume de produção e a ocupação [1].

### 2.3.9 Onde se aplica melhor a opção C

A opção C aplica-se melhor onde:

- O desempenho energético de toda a instalação será avaliado (não só das MREs).
- Existem muitos tipos de MREs numa instalação.
- As MREs implicam actividades cujo consumo individual de energia é difícil de medir separadamente (p. ex. melhoramento de paredes ou janelas, formação de operador).
- A poupança é grande quando comparada com a variação dos dados no consumo de referência, durante o período de reporte.
- Quando as técnicas de medição isoladas de MRE (Opção A ou B) são excessivamente complexas. Por exemplo, quando efeitos interactivos ou interacções entre MREs são substanciais.
- Não são previstas grandes mudanças futuras na instalação durante o período de reporte.
- Podem-se encontrar correlações razoáveis entre o consumo geral de energia e outras variáveis independentes [1].

### 2.3.10 Opção D: simulação calibrada

A opção D, Simulação calibrada, implica a utilização de um software de simulação computadorizado (ver secção 2.4.2) para prever a energia da instalação para um ou ambos os termos da Equação 2.1. Um modelo de simulação deve ser "calibrado" de modo a prever um padrão de energia que corresponda aproximativamente aos verdadeiros dados medidos [1]. Os modelos devem ser calibrados com dados reais horários ou mensais provenientes de facturas [3]. A Opção D pode ser usada para avaliar o desempenho energético de todas as MREs numa instalação, semelhante à Opção C. No entanto, a ferramenta de simulação da Opção D permite também estimar a poupança atribuível a cada MRE num projecto de múltiplas MREs [1].



As entradas do modelo incluem características da instalação, especificações de desempenho de equipamentos novos e já existentes, estimativas de engenharia e medições da instalação a longo prazo. Depois de o modelo ser calibrado<sup>7</sup>, as poupanças são determinadas através da comparação da simulação do período de consumo de referência com uma simulação do período de reporte ou dados actuais da instalação [23].

Prevê-se um custo inicial entre 2 e 8% e um custo operacional anual entre 0,5 e 3% [3].

### 2.3.11 Onde se aplica melhor a opção D

A opção D é melhor aplicada onde:

- Os dados de energia do consumo de referência ou do período de reporte não são de confiança ou não estão disponíveis.
- Existem demasiadas MREs para avaliar (usando as opções A ou B)
- Desempenho energético de cada MRE será estimado individualmente dentro de um projecto de múltiplas MRE, mas os custos das Opções A ou B são excessivos.
- Interações entre as MREs ou os *efeitos interactivos* da MRE são complexos, fazendo com que as técnicas de isolamento das Opções A e B sejam impraticáveis.
- A instalação e as MREs podem ser modeladas por software de simulação bem documentado.
- O software de simulação prevê dados medidos de calibração com uma precisão aceitável [1].

## 2.4 Técnicas de modelização matemática

### 2.4.1 Clustering

*Clustering*<sup>8</sup> é uma classificação não supervisionada de padrões (observações, itens de dados ou vectores) em grupos (*clusters*) [29]. Reconhecimento de padrões pode ser considerado o mais importante problema de aprendizagem não supervisionada, assim, como qualquer outro problema desta natureza, que trata de encontrar uma estrutura numa colecção de dados não marcados [29].

Para que se consiga determinar o grau de pertença a um grupo, os algoritmos de *Clustering* avaliam a distância entre um ponto e o centróide do grupo [30]. Na Figura 2.5 está

---

<sup>7</sup> A calibração é realizada comparando os resultados do modelo de simulação com um conjunto de dados de calibração (podem ser dados de energia medidos, factores estáticos e variáveis independentes).

<sup>8</sup> Uma outra definição de reconhecimento de padrões pode ser o processo de organizar objectos em grupos cujos membros são semelhantes de alguma forma.

um exemplo simples do resultado de um reconhecimento de padrões de cinco grupos aplicado a um conjunto de dados bidimensional.

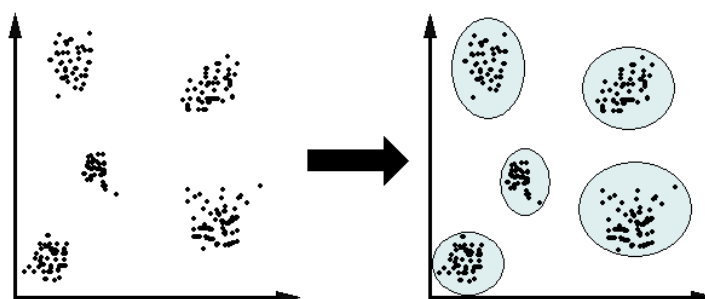


Figura 2.5 - Exemplo de um *Clustering* de cinco grupos.

### 2.4.2 Simulações computadorizadas

Uma auditoria energética pode incluir mais pormenor da utilização de energia através de uma mais abrangente avaliação da utilização de energia. Isto é realizado através da utilização de software de simulação computacional [31].

São programas computacionais que modelizam o desempenho do uso da energia em edifícios comerciais e residenciais. Estes modelos usam informações dos padrões de ocupação, estrutura do edifício, e sua orientação, utilização dos equipamentos que consomem energia, durabilidade dos equipamentos e levantamento das idades destes [32].

Os requisitos para os dados de entrada para os modelos de simulação mais complexos são vastos e requerem uma recolha detalhada de dados do edifício tal como plantas deste. Embora as abordagens de engenharia estão a melhorar e a aumentar em sofisticação, elas geralmente produzem estimativas brutas dos impactos e não capturam factores comportamentais [3].

## 2.5 Plano de Medição e Verificação

### 2.5.1 Abordagem geral aos planos de M&V

O plano de M&V é um documento que define os métodos e técnicas de medição e verificação específicas de um projecto que serão usadas para determinar as poupanças que resultam de um contrato de eficiência energética. O plano deve incluir uma única opção que aborda todas as medidas instaladas numa única instalação ou várias opções de M&V para resolver várias medidas aplicadas na instalação [23].

O plano de M&V deve ser elaborado tendo em conta cada uma destas questões e incluir outras que são específicas para o projecto. Por exemplo, o dono das instalações deve garantir que um técnico da ESCO, devidamente identificado, possa ter acesso as instalações.

É recomendada a preparação de um plano de M&V para a determinação da poupança. Com uma planificação antecipada, garante-se que todos os dados necessários para a determinação da poupança estejam disponíveis após a implementação das MREs, dentro de um orçamento exequível [1].

De uma forma geral o conteúdo de um plano de um projecto de M&V deve:

- Fornecer uma visão geral da MRE e actividades de verificação, incluindo:
  - Estado das metas e objectivos das actividades de verificação.
  - Definir a opção de M&V e técnicas a serem usadas para cada medição.
  - Identificar as principais características físicas das instalações, sistemas ou MREs.
- Definir adequadamente as condições do período de consumo de referência, incluindo:
  - Identificar as principais características de desempenho da base do sistema ou MRE, tais como as intensidades da iluminação e temperaturas.
  - Definir as condições de operação do período de consumo de referência tais como cargas e horas de operação.
  - Detalhar todas as medições, procedimentos de análise de dados, algoritmos e pressupostos.
- Definir todas as actividades no período de reporte, incluindo:
  - Especificar os parâmetros a ser medidos, períodos de medição, precisão requerida, procedimentos de calibração, protocolos de medição, protocolos de aquisição de dados e requisitos de arquivo.
  - Explicar os requisitos para a validação das actividades de M&V.
- Detalhar a calendarização de relatórios e procedimentos de M&V periódicos.
- Descrever procedimentos e detalhes de inspecções anuais.
- Descrever os requisitos para relatórios de operação e manutenção.
- Detalhes de como as poupanças serão calculadas, incluindo:
  - Fornecer justificações e procedimentos para qualquer ajuste de energia no período de consumo de referência ou de reporte.
  - Detalhar como os efeitos interactivos serão tratados [23].

O plano de M&V deve ser elaborado tendo em conta cada uma destas questões e incluir outras que são específicas para o projecto. Por exemplo, o dono das instalações deve garantir que um técnico da ESCO, devidamente identificado, possa ter acesso as instalações [33].

### 2.5.2 Descrição dos pontos a abordar num plano geral de M&V

Segundo o IPMVP, um plano completo de M&V deve incluir a abordagem dos seguintes 13 tópicos [1]:

<b>Objectivo da MRE</b>	Descrever a <i>MRE</i> , o resultado pretendido e os procedimentos da colocação em serviço, que serão utilizados para verificar o sucesso da implementação de cada <i>MRE</i> . Identificar todas as alterações planeadas às condições do <i>consumo de referência</i> (p. ex. a regulação da temperatura de um edifício).
<b>Seleccionar a opção do IPMVP e definir a fronteira de medição</b>	Especificar que opção do IPMVP que será usada para determinar a <i>poupança</i> . Identificar a <i>fronteira de medição</i> da determinação da <i>poupança</i> . Descrever a natureza de quaisquer <i>efeitos interactivos</i> para além da <i>fronteira de medição</i> juntamente com os seus efeitos possíveis.
<b>Referência: Período, energia e condições</b>	<p>Documentar as condições do <i>consumo de referência</i> da instalação e os dados de <i>energia</i>, dentro da <i>fronteira de medição</i>.</p> <p>A documentação do consumo de referência necessária ao plano de M&amp;V é fornecida habitualmente quase toda por uma auditoria energética (utilizada para estabelecer os objectivos de um programa de <i>poupança</i> ou os termos de um <i>contrato de desempenho energético</i>).</p> <p>A documentação do <i>consumo de referência</i> exige geralmente auditorias bem documentadas. A extensão desta informação é determinada pela <i>fronteira de medição</i> escolhida ou o propósito da determinação da <i>poupança</i>. Quando os métodos de M&amp;V de toda a <i>instalação</i> são empregues, todo o equipamento e condições da <i>instalação</i> devem ser documentados.</p>
<b>Período de reporte</b>	Neste ponto deve se identificar o <i>período de reporte</i> (este período pode ser tão curto como uma medição instantânea durante a colocação em serviço de uma <i>MRE</i> , ou tão longo quanto o tempo necessário para recuperar o custo do investimento da <i>MRE</i> ).
<b>Base para o ajuste</b>	Declarar o conjunto de condições ao qual todas as medições de <i>energia</i> serão ajustadas. As condições podem ser as do <i>período de reporte</i> ou um outro conjunto de condições fixas.

<b>Procedimento de análise</b>	Especificar os procedimentos exactos de análise de dados, algoritmos e hipóteses a ser usadas em cada relatório de <i>poupança</i> . Para cada modelo matemático usado, reportar todos os seus termos e a gama de <i>variáveis independentes</i> para o qual é válido.
<b>Preços da energia</b>	Indicar os preços da energia que serão empregues para avaliar a poupança, e se for o caso, como a poupança será ajustada se os preços mudarem no futuro.
<b>Especificações dos aparelhos de medição</b>	Especificar os pontos de contagem e períodos de contagem. Para os contadores que não são das empresas comercializadoras de energia, especificar: as características da contagem, a leitura do contador e protocolo de confirmação, procedimentos da colocação em serviço do contador, processo de calibração de rotina e método de tratamento de dados perdidos.
<b>Responsabilidades de monitorização</b>	Atribuir as responsabilidades de registar os dados de energia, variáveis independentes e factores estáticos dentro da fronteira de medição durante o período de reporte.
<b>Precisão esperada</b>	Avaliar a precisão esperada associada à medição, recolha de dados, amostragem e análise de dados. Esta avaliação deve incluir medidas qualitativas e todas as medidas quantitativas possíveis do nível de incerteza nas medições e ajustes a usar no relatório de <i>poupança</i> planeado.
<b>Orçamento</b>	Definir o orçamento e os recursos necessários para a determinação da <i>poupança</i> , os custos iniciais estabelecidos e os custos contínuos durante o <i>período de reporte</i> .
<b>Formato do relatório</b>	Indicar como os resultados serão reportados e documentados. Deve ser incluída uma amostra de cada relatório.
<b>Garantia de qualidade</b>	Especificar os procedimentos de garantia de qualidade que serão empregues para os relatórios de <i>poupança</i> e todos os passos provisórios na preparação dos relatórios.

### 2.5.3 Pontos adicionais a abordar num plano de M&V, para a opção A e D

Dependentemente da opção do IPMVP seleccionada, alguns tópicos adicionais devem ser também abordados para tornar o plano de M&V ainda mais completo, para a opção A tem-se [1]:

#### Justificação das estimativas

Apresentar os pressupostos usados para a estimativa da informação usada para a estimativa. Mostrar a importância global destas *estimativas* em função do total da *poupança* prevista, mostrando a gama de *poupanças* possível associada à gama de valores verosímeis dos parâmetros *estimados*.

#### Inspecções Periódicas

Definir as inspecções periódicas que serão efectuadas durante o *período de reporte* para verificar se o equipamento ainda está no lugar e a funcionar como previsto quando se determinou os valores *estimados*.

Para a opção D [1]:

#### Nome do software

Registar o nome e o número da versão do software de simulação a ser utilizado.

#### Dados de entrada/saída

Fornecer uma cópia em papel e uma cópia electrónica dos ficheiros de entrada, dos ficheiros de saída e dos ficheiros dos dados climatéricos usados para a simulação.

#### Dados medidos

Anotar quais os parâmetros de entrada que foram medidos e quais os que foram estimados. Descrever o processo de obtenção dos dados medidos.

#### Calibração

Registar os dados de *energia*, os dados de funcionamento utilizados para a calibração e a precisão com a qual os resultados da simulação correspondem aos dados de *energia* da calibração.

## 2.6 Contratos de Desempenho Energético

Os engenheiros viveram uns tempos difíceis vendendo os seus projectos para a conservação da energia aos seus gestores e financiadores de projectos. Eles tipicamente entendiam os princípios e conceitos científicos e de engenharia e intuitivamente sabiam como os projectos produziram poupanças de energia. No entanto, de forma a garantirem financiamento para projectos, o financiador tem que concluir que são satisfeitas as condições de que o projecto irá criar poupanças e que é atingido pelo menos o mínimo de poupanças energéticas [34].

Num EPC (*Energy Performance Contract*), a empresa de serviços energéticos (ESCO) fornece capacidades de engenharia, projecto, gestão na construção, mão-de-obra, equipamentos e por vezes manutenção para reduzir os consumos de energia [23]. Estes serviços são agrupados em custos do projecto e são reembolsados por meio da remuneração proveniente das poupanças geradas [35]. Os EPC foram desenvolvidos nos Estados Unidos da América, sendo mais frequentemente usados em instalações do sector público e comercial [36].

Em Portugal, ainda não se realizou nenhum grande EPC devido à complexidade que um contrato deste tipo envolve. Existe alguma actividade do tipo ESCO mas esta limita-se à simples troca de um ou outro equipamento isolado [14].

O mercado Português das ESCO está a crescer dado o aumento de preocupação e de obrigações com a eficiência energética [37].

De forma a se assegurar o sucesso dos projectos de conservação energética, os engenheiros devem considerar sempre o uso de técnicas de medição para medir e verificar as poupanças atingidas [34].

Um contrato de desempenho energético é uma parceria entre uma ESCO e o seu cliente formada com o propósito de proporcionar um financiamento e execução de medidas de racionalização energética (MRE) [33]. A ESCO encarrega-se de suportar os custos de aquisição e instalação de novos equipamentos e o cliente paga à ESCO durante o tempo de vida do contrato, dividindo os proveitos resultantes do projecto. Os EPC's têm sido usados por clientes públicos e privados há mais de vinte anos e têm sido prova de ser um método eficaz para a modernização das instalações existentes [38].

A ESCO é responsável por fazer manutenções periódicas ao equipamento, tal como medir constantemente os consumos energéticos e as poupanças [39].

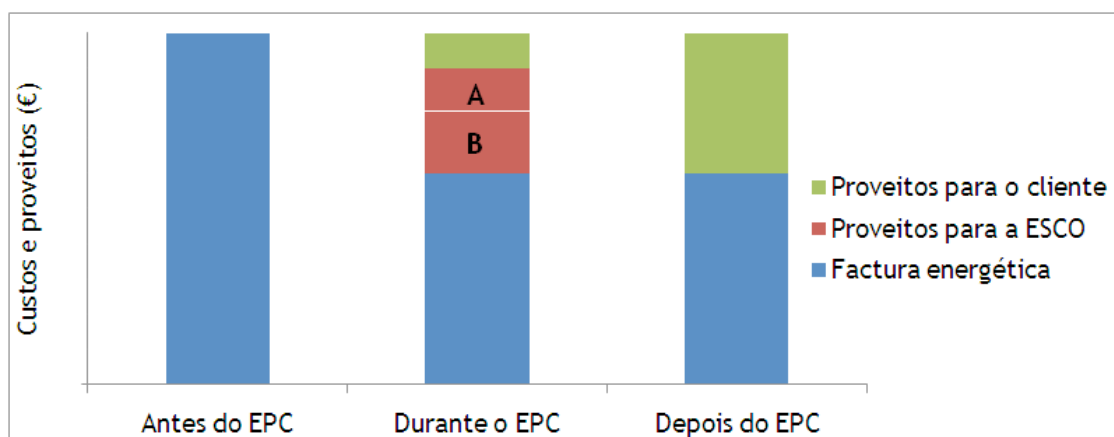


Figura 2.6 - Distribuição dos custos e proveitos associados a um EPC [40].

Na zona assinalada com um A estão os proveitos para a empresa ESCO e na zona B estão os custos que a ESCO tem para pagar o financiamento da medida de racionalização energética [40].

## 2.7 Incerteza

### 2.7.1 Introdução

Quaisquer poupanças medidas incluem algum grau de incerteza. Uma vez que nenhum instrumento pode ser totalmente preciso, todas as medições contêm algum erro ou diferença entre o valor verdadeiro e o observado. Além disso, as poupanças de energia são tipicamente baseadas em valores medidos, que em certa medida são estimativas [23].

Deve-se sempre atribuir um certo peso aos graus de incerteza associados aos cenários montados e criar um modelo matemático compatível [41].

Como acontece com todas as estimativas, haverá alguma incerteza nos números reportados. O objectivo de cada projecto é reduzir a incerteza dos valores reportados, que é realizado pela limitação dos erros nas medições e análises efectuadas [23].

### 2.7.2 Incerteza na M&V

O objectivo da M&V é determinar com confiança a *poupança de energia*. Para que os relatórios de *poupança* sejam de confiança, precisam de ter um nível razoável de incerteza [42].

O esforço empreendido na determinação poupança deve centrar-se na gestão da incerteza criada no processo de modelização matemática. MRE's com as quais se está mais familiarizado podem exigir menos esforço do que noutras MRE's incomuns. O próprio processo de determinação de poupanças introduz incertezas [43].



A incerteza de um relatório de *poupança* pode ser gerida, controlando erros aleatórios e a parcialidade dos dados [42]. Os erros aleatórios são afectados pela qualidade do equipamento de medição, as técnicas de medição e a concepção do procedimento de amostragem. A parcialidade dos dados é afectada pela qualidade dos dados de medição, suposições e análises. A redução dos erros aumenta habitualmente o custo da M&V, por isso a necessidade de uma incerteza melhorada deve ser justificada pelo valor da informação melhorada [1].

Um dos aspectos mais desafiantes da M&V é fornecer uma precisão adequada enquanto assegura que os custos são razoáveis. Tal como é mostrado na Figura 2.7, o valor incremental das informações obtidas por medições e verificações adicionais, será, em algum ponto inferior ao custo para obtê-la. Infelizmente, não há uma forma fácil para definir este ponto e deve basear-se num julgamento e experiência para determinar o que é rentável e o que não é.

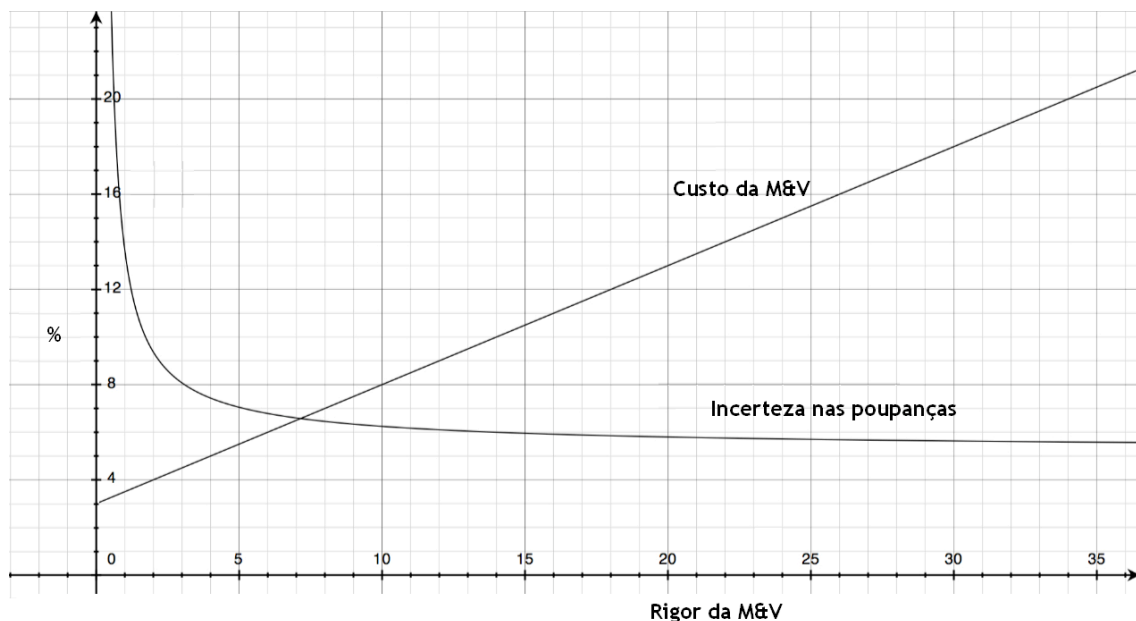


Figura 2.7 - A lei dos proveitos decrescentes da M&V [23].

### 2.7.3 Comportamento humano

A utilização da energia de um edifício depende também do comportamento e as decisões dos ocupantes e proprietários. Estudos mostraram que as variações no uso da energia eram mais do que um factor em duas casas que eram idênticas mas tinham diferentes ocupantes. Encontrou-se uma variação de 40% e 54% no consumo de electricidade em nove infantários numa pequena área de Londres. Quando os responsáveis pelos infantários souberam que os seus consumos estavam a ser monitorizados, o consumo de electricidade gás também caiu. O comportamento dos ocupantes de edifícios não residenciais também tem um substancial

impacto sobre a utilização de energia, especialmente quando a iluminação, aquecimento e ventilação são controlados manualmente [44].

## 3 Contributos para metodologia de M&V

### 3.1 Sistema de apoio à identificação de diagramas de referência e identificação de relações com variáveis explicadoras

Para que um sistema de apoio à identificação de diagramas de referência e identificação de relações com variáveis explicadoras produza bons resultados, é necessário registar-se, para além da variável dependente (valores de energia ou potência da instalação), valores de outras variáveis. Estas últimas são denominadas de variáveis independentes ou explicadoras, que podem ser por exemplo valores de temperatura, radiação solar, níveis de ocupação da instalação ou níveis de produção de uma fábrica.

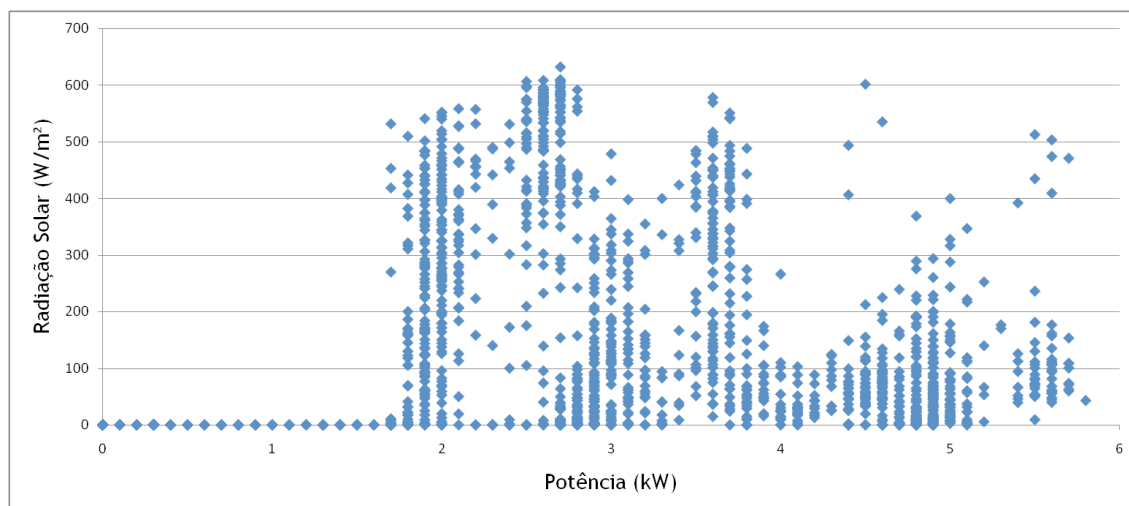
Depois de se ter acesso aos dados que poderão entrar num modelo matemático explicativo das variações nos consumos energéticos, é necessário verificar-se a correlação<sup>9</sup> entre a variável dependente e as variáveis independentes. Por outras palavras, é fundamental comprovar se há variáveis independentes que conseguem explicar as variações nos consumos energéticos.

Se não se verificar uma correlação forte entre o conjunto de variáveis independentes e a variável dependente, deve-se diminuir o período de amostragem.

Por exemplo, na Figura 3.1 pode-se ver que não há qualquer correlação entre a radiação solar média e a potência activa, se forem consideradas medições a cada 15 minutos.

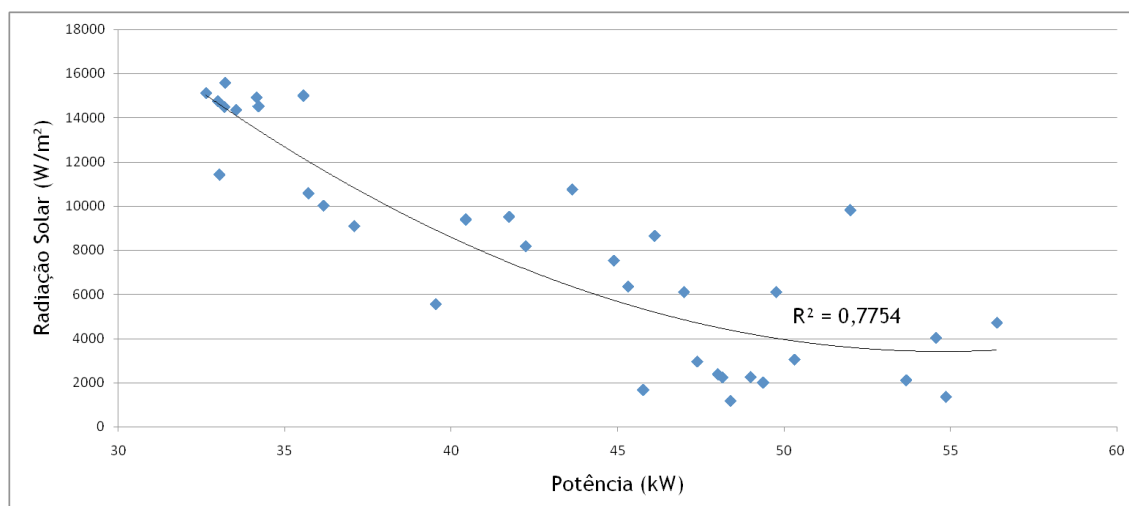
---

<sup>9</sup> Correlação, também chamada de coeficiente de correlação, indica a força e a direcção do relacionamento linear entre duas variáveis aleatórias.



**Figura 3.1** - Correlação entre radiação solar média e Potência activa do sistema de iluminação da cafetaria, valores de cada 15 minutos.

Por outro lado, se o período de amostragem for diminuído de 15 minutos para um dia, consegue-se identificar uma correlação forte entre as mesmas variáveis (ver Figura 3.2).

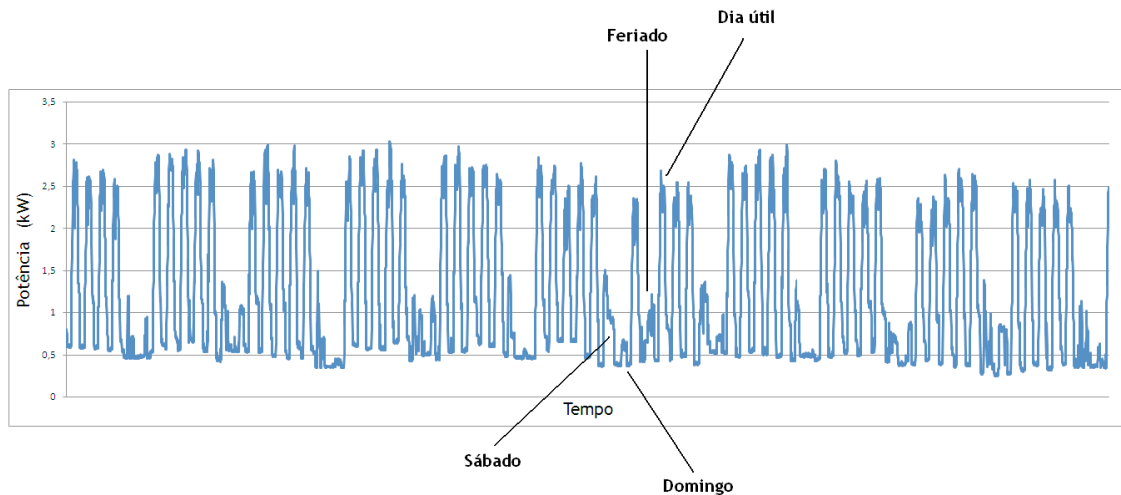


**Figura 3.2** - Correlação entre radiação solar média e Potência activa do sistema de iluminação da cafetaria, valores de cada dia.

Mesmo depois de se diminuir o período de amostragem, não se verificar quaisquer correlações, não há outra hipótese a não ser criar um modelo matemático que dependa apenas da variável dependente. Pode-se ver um exemplo desta abordagem na secção 4.3.2 (opção B do IPMVP, sistema AVAC da Cafetaria).

Se o diagrama diário não for sempre o mesmo, ou seja, consoante regras simples facilmente podem-se considerar que há vários diagramas que se repetem, deve-se criar vários diagramas médios. Se por outro lado, o diagrama diário for continuamente repetido, basta apenas criar-se um diagrama médio para explicar os consumos energéticos.

Por exemplo, na Figura 3.3, não foi identificada quaisquer correlações com alguma variável independente, no entanto, facilmente se identificam três diagramas diferentes a repetir-se no tempo: dias úteis, sábados e feriados e por fim, um terceiro diagrama para os domingos. Na secção 4.4.1 foi usada esta técnica de modelização matemática (opção C do IPMVP, edifício de escritórios).



**Figura 3.3** - Gráfico da potência activa trifásica medida, onde é possível identificar-se diagramas correspondentes a dias úteis, sábados, domingos e feriados.

Nos casos em que se consegue definir pelo menos uma variável independente que consiga explicar de alguma forma as variações nos consumos energéticos, tem que se partir para outras abordagens.

Sempre que se possa ter variáveis independentes com um bom nível de correlação com a variável dependente, devem ser usadas, obtendo-se sempre um modelo matemático melhor do que uma média dos consumos registados.

Nos casos onde não se consegue encontrar formas de diagrama substancialmente diferentes a repetirem-se no tempo, determinam-se equações que explicam as relações entre as variáveis. Um exemplo desta opção está patente na secção 4.2.1 (Abordagem à opção A do IPMVP para o edifício de escritórios).

Por fim, em situações em que variáveis independentes conseguem explicar as variações nos consumos energéticos e onde haja um conjunto de formas de diagramas que se repetem, deve-se usar técnicas de reconhecimento de padrões para definir o modelo. Depois de se identificarem as variáveis externas relevantes, tem que se definir quantos diagramas diferentes podem existir, nos casos em que há dúvida na quantidade de diagramas, devem-se testar as várias hipóteses.

Depois de definidas as formas dos diagramas (pontos centrais dos clusters), é necessário construir-se um conjunto de regras, que fidedignamente, determinem a escolha de um diagrama para cada dia. Depois de se ter a forma de diagrama atribuída a cada dia, é necessário proceder-se a uma calibração do diagrama para que a previsão de energia



## 3.2 Ferramentas de apoio à Medição e Verificação

### 3.2.1 Técnicas de Clustering

Tentaram-se explorar todos os dados à procura de padrões consistentes tais como regras de associações ou sequências temporais, para se tentar detectar relacionamentos sistemáticos entre variáveis, detectando assim novos subconjuntos de dados.

As técnicas de reconhecimento de padrões são boas para se identificar formas de diagrama, para se descobrirem padrões diferentes de consumos energéticos, por isso, é necessário fazer-se uma normalização dos dados para que no diagrama apenas se tenha uma forma. Para cada dia calculou-se a energia consumida, de seguida fez-se uma normalização, criando-se perfis de consumo diário de área igual a 1, para todos os dados.

Para se poderem obter ainda melhores resultados, filtraram-se os dados, ficando-se apenas com intervalos diários entre as 7h e as 22h, os fins-de-semana e feriados foram retirados<sup>10</sup>. Depois da filtragem, ficou-se com os dados prontos para serem inseridos no Matlab, foram escolhidos 34 pontos (dias) com dimensão 61, com as potências médias de cada um dos 61 intervalos de 15 minutos.

Como não se consegue ter uma ideia clara quanto ao número de elementos a definir, foi necessário testar-se várias hipóteses. Este passo é exemplificado na Figura 3.5, se fossem escolhidos apenas três elementos perder-se-ia robustez no modelo, haveria falta de informação obtendo-se um erro superior ao modelo com quatro elementos. Por outro lado se fossem escolhidos cinco ou mais elementos ter-se-ia um excesso de informação, criando um conflito entre modelos, ficando dois ou mais elementos a gerar uma forma de diagrama demasiado semelhante. Por exemplo pode-se observar que na opção de cinco elementos, o elemento número quatro e cinco são praticamente iguais.

A partir do Matlab pode-se retirar duas matrizes:

- Matriz [U], de dimensão número de grupos por número de dias, permite obter o nível de pertença de cada ponto a determinado grupo.
- Matriz [Center], de dimensão número de grupos por número de intervalos de tempo do diagrama, onde se obtêm os pontos centrais de cada elemento do grupo.

---

<sup>10</sup> Foram retirados todos os pontos em que é sempre registado um consumo energético igual a zero, de forma a reduzir-se a complexidade do *Clustering*, obtendo-se melhores resultados.

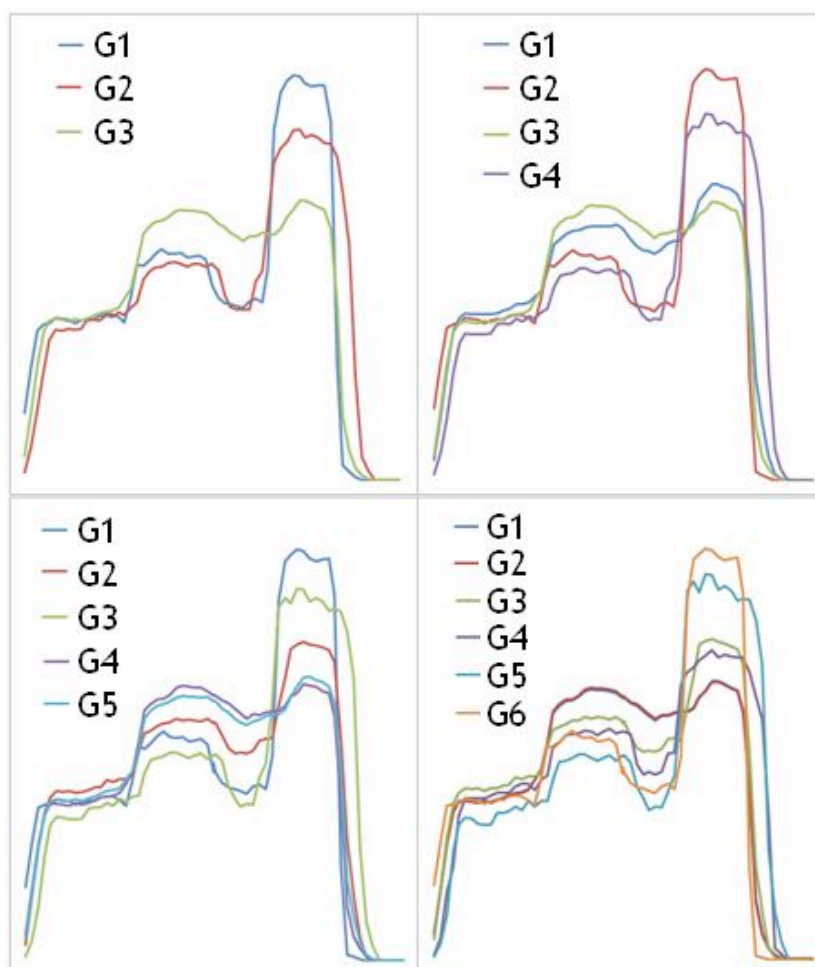


Figura 3.5 - Exemplo de pontos centrais de grupos de 3, 4, 5 e 6 elementos.

Estando os elementos do grupo definidos (pontos centrais), é necessário criar-se um conjunto de regras que permitam a escolha um diagrama para um determinado dia, baseados em variáveis independentes (p. ex. definir a escolha de um determinado diagrama apenas tendo em conta vários níveis de ocupação de um edifício).

Para ajudar à definição das regras, deve-se recorrer à matriz “U” proveniente do Matlab, que permite que se saiba quais os diagramas diários pertencem a cada elemento do grupo. Como exemplo, na Tabela 3.1 está presente o nível de pertença de nove pontos (dias) a um determinado elemento do grupo, para se definir a que elemento pertence um determinado dia basta encontrar o nível máximo de pertença.

Tabela 3.1 - Exemplo da matriz das pertenças (matriz U) para nove diagramas diários e quatro elementos de Cluster.

	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9
Elemento 1	0,0729	0,1447	0,4150	0,3373	0,1784	0,4481	0,3105	0,4095	0,0674
Elemento 2	0,0738	0,1101	0,0260	0,1089	0,0849	0,1316	0,0656	0,0432	0,8264
Elemento 3	0,0543	0,1026	0,5374	0,2684	0,1190	0,2418	0,5750	0,5097	0,0560
Elemento 4	0,7987	0,6424	0,0214	0,2852	0,6175	0,1783	0,0486	0,0374	0,0500



Para este pequeno exemplo, os dias 4,6 e 8 pertencem ao elemento 1 do *Cluster*, o dia 9 ao elemento 2, os dias 3 e 7 ao elemento 3 e finalmente os dias 1, 2 e 5 pertencem ao elemento 4.

Definidas as pertenças de cada dia a cada elemento, é necessário definir-se um conjunto de regras que permitam uma correcta escolha de um elemento de um cluster para um determinado dia.

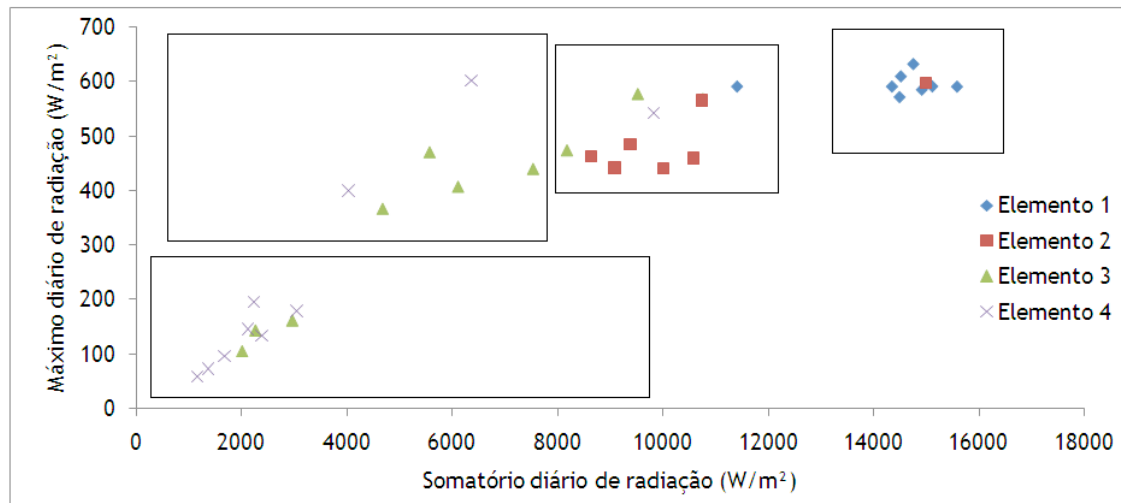


Figura 3.6 - Relação entre variáveis independentes e elementos de cada grupo.

Com as regras que se podem retirar da Figura 3.6 e com os pontos centrais da Figura 3.5, já se pode ter definida uma forma de diagrama para qualquer dia. Para que o modelo de previsão esteja concluído, basta apenas multiplicar a forma por uma previsão do consumo diário de energia, sendo este passo chamado de calibração do modelo matemático, são usadas variáveis independentes para se conseguir definir o consumo diário.

### 3.3 Modelos de incertezas

#### 3.3.1 Introdução

A M&V tem como grande objectivo determinar com fiabilidade as poupanças de energia, por esta razão é exigível que os relatórios de poupança tenham um bom nível de incerteza. Para que uma poupança de energia possa ser estatisticamente válida, esta deve ser expressa em conjunto com os seus intervalos de confiança.

Dependendo do tipo de dados de erro e da dificuldade da determinação da distribuição de erros, seguiram-se três metodologias diferentes:

- Segundo o anexo b do IPMVP, calcular a precisão relativa para um determinado intervalo de confiança, segundo uma distribuição t de *Student*.

- Definir os valores de erro que fazem parte do intervalo de confiança, segundo uma distribuição normal.
- Usar a função de distribuição empírica para determinar os quantis do conjunto de dados de erro.

A escolha entre as metodologias regeu-se pelo seguinte fluxograma:

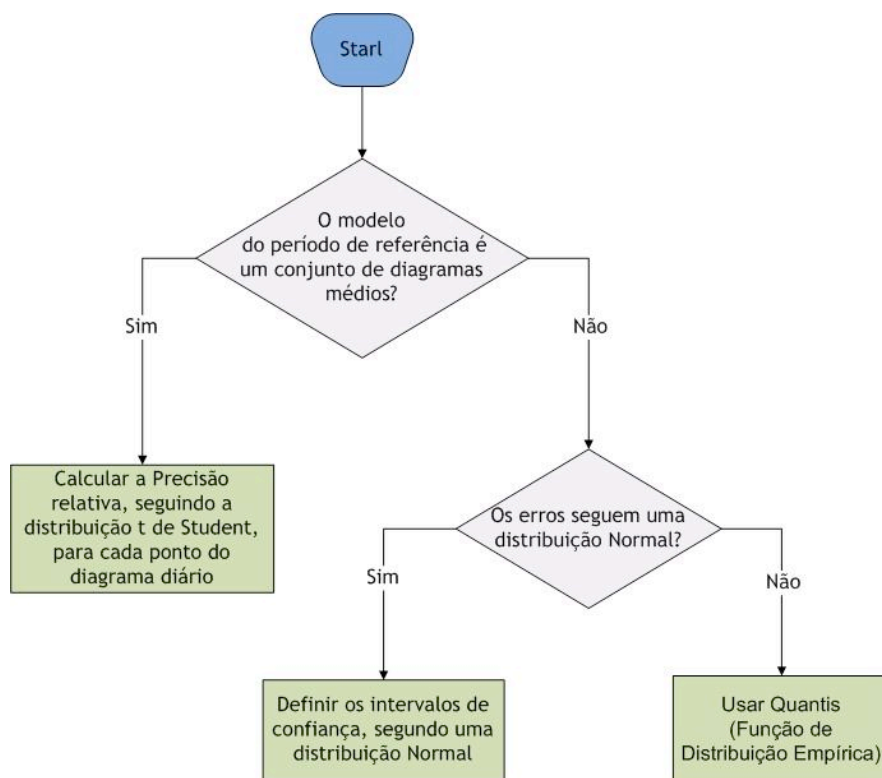


Figura 3.7 - Fluxograma que permite a escolha das várias abordagens ao cálculo de incertezas.

### 3.3.2 Modelo baseado na distribuição t de Student

Nos casos em que foram calculados diagramas médios de consumo energético, usou-se esta metodologia que tem a grande vantagem de se poder calcular uma precisão relativa para todos os pontos do diagrama. Desta forma consegue-se saber em que parte do dia há uma maior variância nos consumos.

Esta metodologia permite que posteriormente, ao aplicar-se as medidas de racionalização energética, se possa combater esta variabilidade, aumentando a confiança com que as poupanças são calculadas. Por exemplo, no modelo determinado para os sábados e feriados do piso 4 do edifício de escritórios (opção A do IPMVP), há um período entre as 9h e as 12h onde o nível de incertezas aumenta drasticamente, comparativamente a outros períodos do dia (ver Figura 3.8).

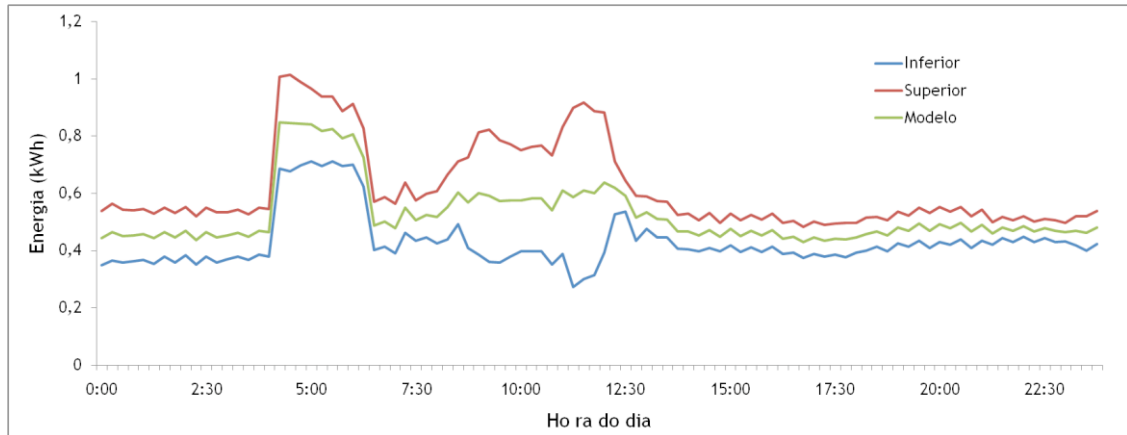


Figura 3.8 - Exemplo da forma como o nível de incertezas pode variar ao longo de um diagrama.

Neste modelo de incertezas, é necessário seguir e repetir um conjunto de passos para cada ponto do diagrama médio. O primeiro passo consiste no cálculo da variância ( $S^2$ ):

$$S^2 = \frac{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}{n - 1} \quad (3.1)$$

A variância é uma medida da sua dispersão estatística, que indica quão longe os seus valores se encontram do valor médio. Quanto maior a variância, maior a incerteza na média.

A variância é igual ao somatório do quadrado das diferenças entre o valor médio de energia consumida ( $\bar{Y}$ ) e o valor de energia consumida a cada dia ( $Y_i$ ), a dividir pelo número de dias ( $n$ ) subtraído de 1.

De seguida deve-se calcular o erro padrão (EP), que é igual ao desvio padrão ( $S$ ) dividido pela raiz do número de medições feitas (dias que entraram para a criação do modelo do consumo de referência):

$$EP = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3.2)$$

Por fim calcula-se a precisão absoluta, que é igual ao erro padrão multiplicado por um valor “ $t$ ”, originário de uma tabela  $t$  de *Student* (para um determinado numero de medições feitas e para um intervalo de confiança estabelecido):

$$Precisão_{absoluta} = t \times EP \quad (3.3)$$

Espera-se que o verdadeiro valor da estimativa estatística esteja dentro do domínio definido pela equação (3.4):

$$\text{Domínio} = \text{Modelo} \pm \text{Precisão}_{\text{absoluta}} \quad (3.4)$$

Resumindo, a precisão absoluta pode ser definida apenas com uma equação:

$$\text{Precisão}_{\text{absoluta}} = t \times \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2 \times n}{n - 1}} \quad (3.5)$$

### 3.3.3 Modelo baseado numa distribuição normal

Para este modelo de incertezas, é necessário observar-se o espectro do erro, através da aplicação de histogramas a todos os dados de erro (ver Figura 3.9). A função distribuição normal pode ser expressa cumulativamente<sup>11</sup> ou não, para efeitos de visualização de erros é melhor não se usar a forma cumulativa, para cálculo do intervalo do erro é necessário usar-se uma distribuição cumulativa.

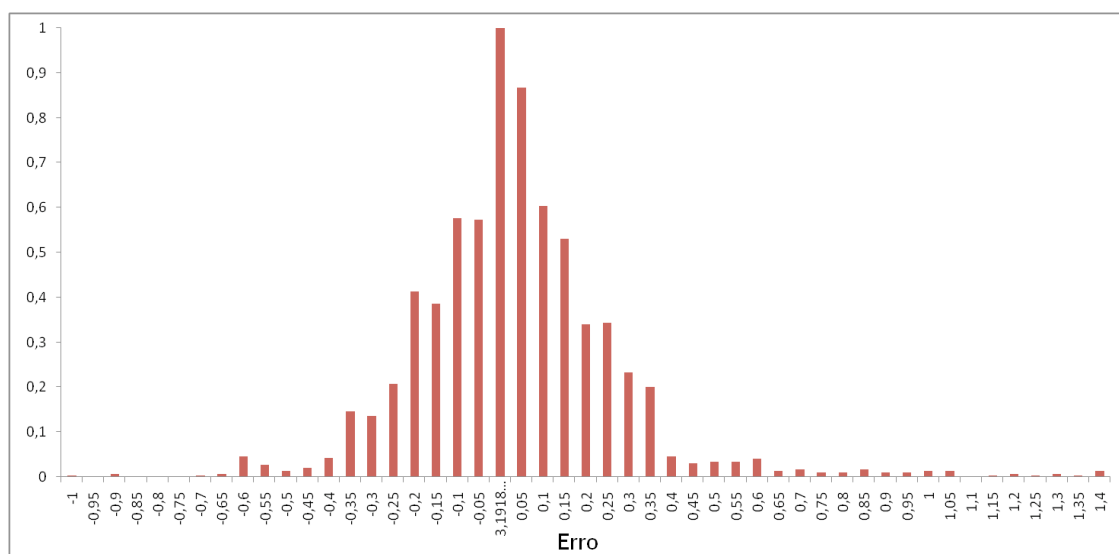


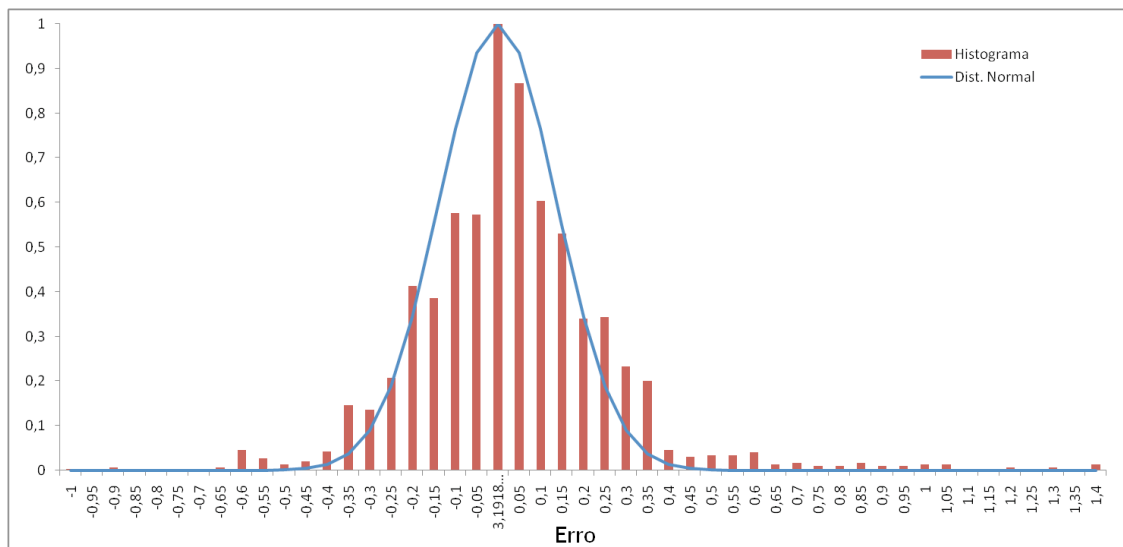
Figura 3.9 - Exemplo de um histograma dos erros.

Depois de se terem os histogramas calculados é necessário encontrar-se uma distribuição normal<sup>12</sup> que explicasse bem a distribuição dos erros. A função distribuição de

<sup>11</sup> Cumulativa significa que para um determinado erro, tem-se todas as probabilidades anteriores somadas, quer dizer que existe uma certa probabilidade de o erro ser menor ou igual a um determinado valor, que as probabilidades vão sendo somadas, chegando-se a um limite de probabilidade igual a 1 para o valor máximo de erro.

<sup>12</sup> Também chamada de Distribuição de Gauss ou Gaussiana.

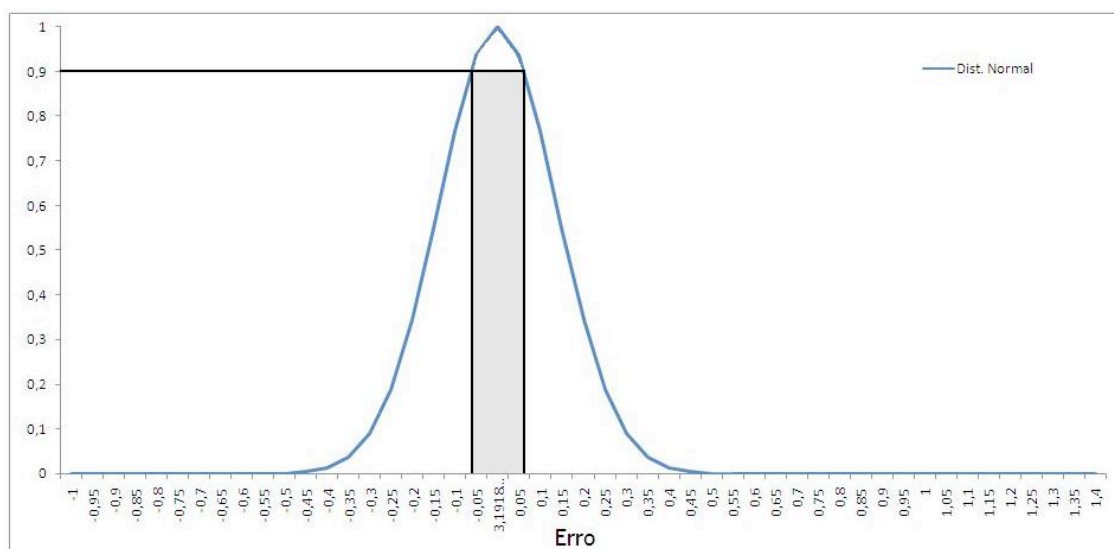
probabilidade foi calculada de maneira a que o quadrado da diferença entre os valores do histograma e os da função seja minimizado, fazendo-se variar o desvio padrão e a média. Para o exemplo mostrado acima, tem-se o resultado da optimização na Figura 3.10.



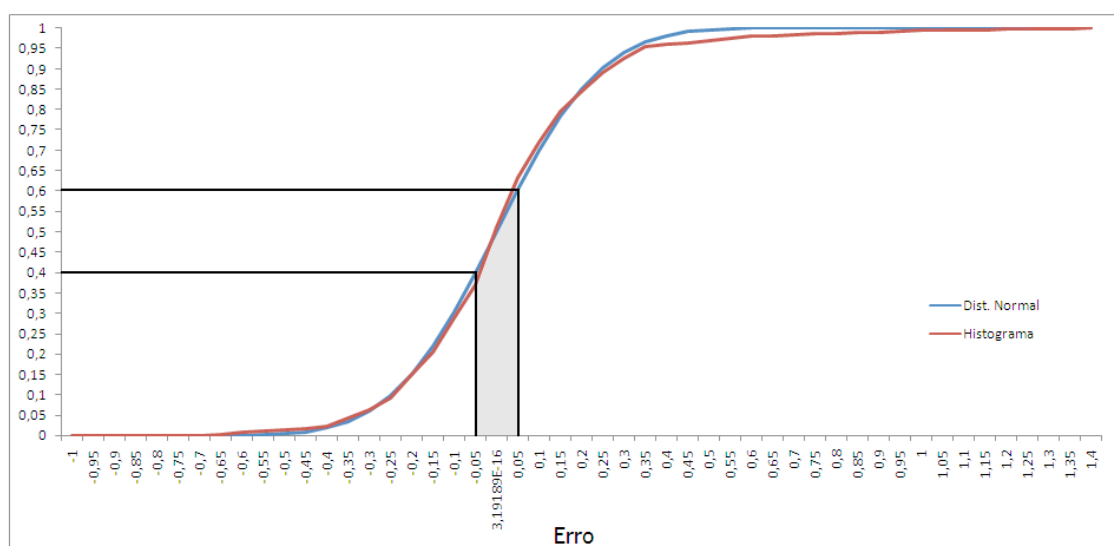
**Figura 3.10** - Exemplo do resultado da optimização de uma função distribuição de probabilidade a um conjunto de erros.

Os erros desta optimização são ignorados e passa-se a considerar apenas a função distribuição normal. Como o objectivo deste modelo era definir um intervalo de erro para um determinado intervalo de confiança, basta determinar-se o valor máximo e mínimo que estão dentro do intervalo de confiança, esta característica é visível na Figura 3.11.

Esta metodologia tem como grande desvantagem ter que ter muitos dados de erro, não permitindo uma desagregação tão grande como a metodologia apresentada acima, o que faz com que apenas se possa ter um valor de erro para intervalos maiores, por exemplo um dia ou parte dele. Nesta metodologia, o intervalo de erro para um determinado intervalo de confiança pode não estar centrado em zero, dependendo da média da função distribuição de probabilidade definida. Na Figura 3.12 está exemplificada graficamente a forma como se encontra o intervalo de erro. Matematicamente o mesmo exemplo é definido como a função inversa de *Gauss* cumulativa para os valores de 0,4 e 0,6.



**Figura 3.11** - Gráfico que exemplifica de que forma se encontra o intervalo de erro para um intervalo de confiança de 90% (função não cumulativa).

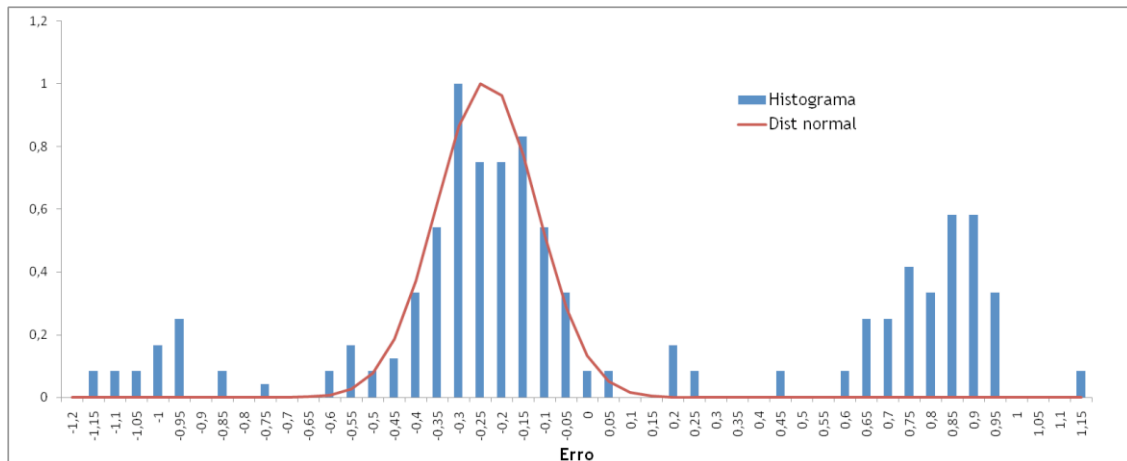


**Figura 3.12** - Gráfico que exemplifica de que forma se encontra o intervalo de erro para um intervalo de confiança de 90% (função cumulativa).

### 3.3.4 Modelo baseado em Quantis Amostrais

Em situações em que o modelo do consumo de referência não é um diagrama médio e não há uma distribuição normal que explique razoavelmente bem os erros (ver Figura 3.13), usou-se o método dos quantis, onde se cria uma lista ordenada dos valores dos erros amostrais e depois faz-se uma contagem percentual<sup>13</sup> destes.

<sup>13</sup> Neste caso os quantis adquirem um nome especial - Percentil.



**Figura 3.13** - Exemplo de histograma de erros não explicável por uma distribuição normal.

Se neste exemplo fosse usada esta aproximação a uma distribuição normal, grande parte da série de erros estaria a ser ignorada, criando-se um intervalo de confiança bastante irrealista, fazendo com que as poupanças sejam comunicadas de uma forma estatisticamente inválida.

Para o exemplo mostrado na Figura 3.13 foram calculados vinte quantis, ou seja, permite que se possa saber qual o intervalo do erro para intervalos de confiança com intervalos de 5% (ver Tabela 3.2).

**Tabela 3.2** - Exemplo de um quantil determinado para o sistema de iluminação da cafeteria.

Erro (kWh)	Quantil	Erro (kWh)	Quantil
-0,85658	5,0%	0,008224	55,0%
-0,55183	10,0%	0,034207	60,0%
-0,3979	15,0%	0,064469	65,0%
-0,26396	20,0%	0,103071	70,0%
-0,2137	25,0%	0,170982	75,0%
-0,13387	30,0%	0,258248	80,0%
-0,09213	35,0%	0,377176	85,0%
-0,05775	40,0%	0,597997	90,0%
-0,02074	45,0%	0,796565	95,0%
-0,00706	50,0%	3,751674	100,0%

A título de exemplo, para um intervalo de confiança de 90% pode-se dizer que o erro está dentro do intervalo [-0,55183 kWh;0,597997kWh]. Por outro lado, por exemplo, também se pode determinar que 20% dos erros têm valor igual ou inferior a -0,26396kWh.





## 4 Exemplos de casos de M&V - Período do consumo de referência

### 4.1 Descrição

Através da instalação de aparelhos de medição e monitorização a montante dos circuitos eléctricos sujeitos a medidas de racionalização energética, é possível definir-se com algum grau de incerteza o nível de poupanças alcançadas.

Tem-se dois casos de estudo, a cafetaria/restaurante e o edifício de escritórios, nos quais estão instalados os vários aparelhos de medição e monitorização. Com os dados por estes recolhidos, pode-se definir um período de consumo de referência e, após implementação da MRE, comparar o consumo energético real com um consumo de referência devidamente ajustado, passando a ser possível calcular as poupanças energéticas.

Em cada caso de estudo tentou-se explorar o máximo de hipóteses de abordagens às metodologias sugeridas no IPMVP, para cada caso usaram-se várias técnicas de modelização matemática para preparar o ajuste de rotina ao consumo de referência (ver equação 1 do capítulo 2). A modelização envolve encontrar as relações matemáticas entre as variáveis dependentes e independentes. A variável dependente é usualmente energia ou potência, é modelizada como podendo ser dependente de uma ou mais variáveis independentes, que também são conhecidas por variáveis explicadoras.

## **4.2 Opção A do IPMVP**

### **4.2.1 Edifício de escritórios**

A poupança é determinada pela medição no terreno dos parâmetros chave do desempenho energético, que define o consumo de energia dos sistemas afectados pela medida de racionalização energética. Nesta abordagem ao caso de estudo do edifício de escritórios, seguiu-se um conjunto de passos para que se tenha um custo de M&V inferior (comparativamente à opção B do IPMVP) e um nível de incertezas aceitável.

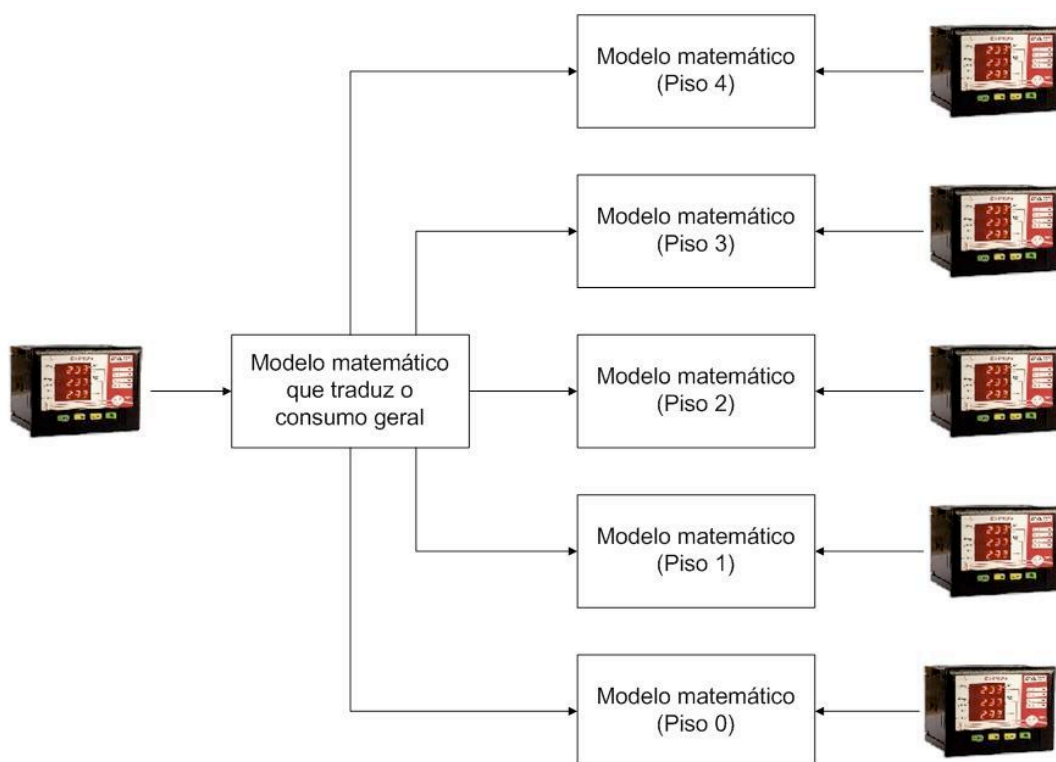
No período de consumo de referência foi utilizado um esquema de ligações dos aparelhos de medição diferente do esquema do período de referência, atendendo às características desta metodologia e as necessidades de contenção de custos.

#### **4.2.1.1 Definição dos modelos matemáticos do período de consumo de referência**

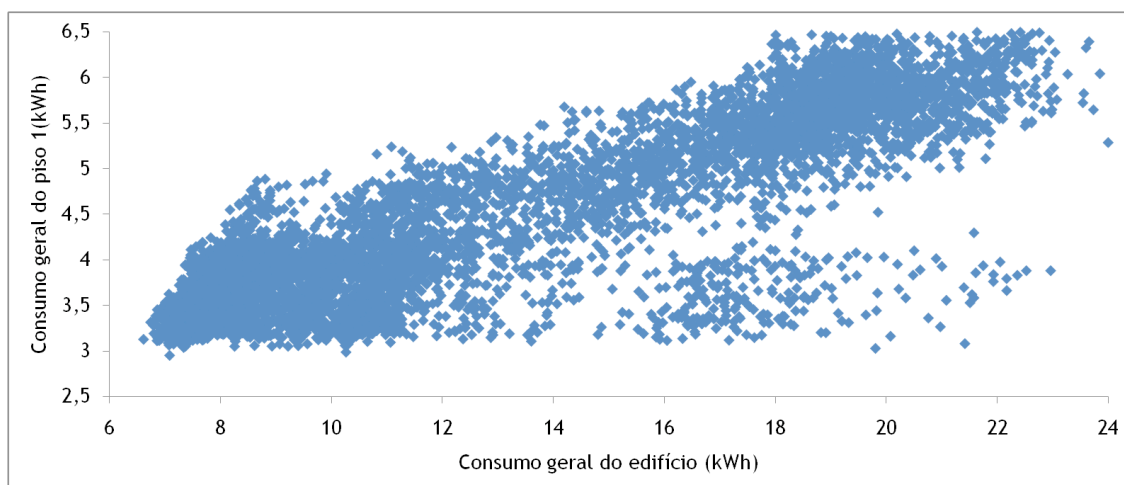
Neste caso de estudo é tido em conta que estão instalados aparelhos de medição em cada um dos pisos e mais um para medir o consumo geral do edifício.

A partir de um modelo que consegue explicar e prever o consumo geral, foram criados modelos de regressão a depender do geral, de maneira a que se consiga explicar o consumo de cada um dos pisos, para cada tipo de dia diferente - dias úteis, sábados e feriados e domingos.

Cada um dos modelos é criado de acordo com os dados obtidos pelo aparelho de medição do consumo geral. Para isso é verificada a relação entre o consumo de cada piso e o consumo geral.



**Figura 4.1** - Esquematização de funcionamento dos Modelos Matemáticos, e sua relação com os aparelhos de medição, para o período de consumo de referência.



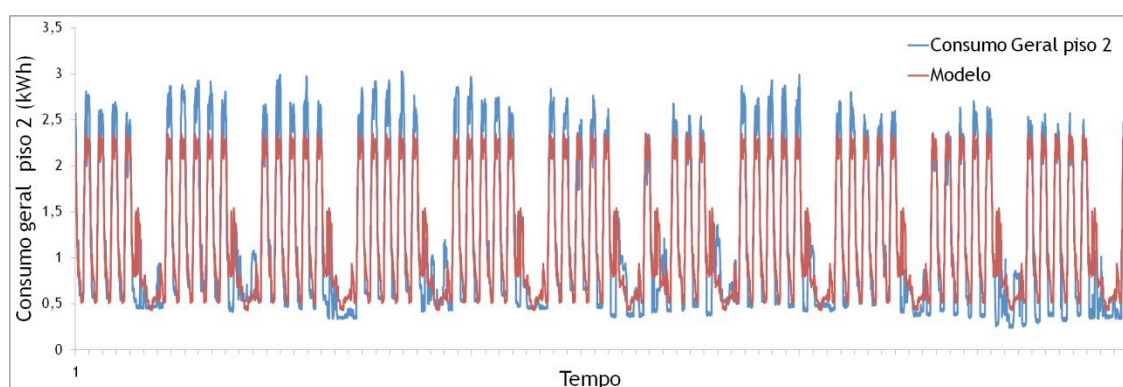
**Figura 4.2** - Exemplo da correlação entre variáveis, neste caso do consumo geral do piso 1 com o consumo de todo o edifício.

Utilizando-se técnicas de regressões lineares, onde a variável dependente na equação da regressão é modelizada como função das variáveis independentes. A cada variável independente é multiplicado um parâmetro (constante) correspondente e à equação é somado um termo de erro. O termo de erro é tratado como uma variável aleatória e representa uma variação inexplicável na variável dependente.

Os parâmetros foram ajustados para dar um melhor ajuste aos dados, de maneira a que o somatório do quadrado dos erros (diferença entre o valor real e o estimado) seja o mais pequeno possível. Como método de optimização, foi usado o método dos mínimos quadrados com minimização realizada pelo solver do *Excel*.

#### 4.2.1.2 Análise de erros dos modelos matemáticos

Determinadas as relações entre variáveis e estabelecidas as equações, fez-se uma previsão dos consumos em cada um dos pisos, tendo como base uma previsão do consumo geral do edifício (feita da mesma forma que nas opções B e C do IPMVP, apresentado em 4.3.3 e 4.4.1).

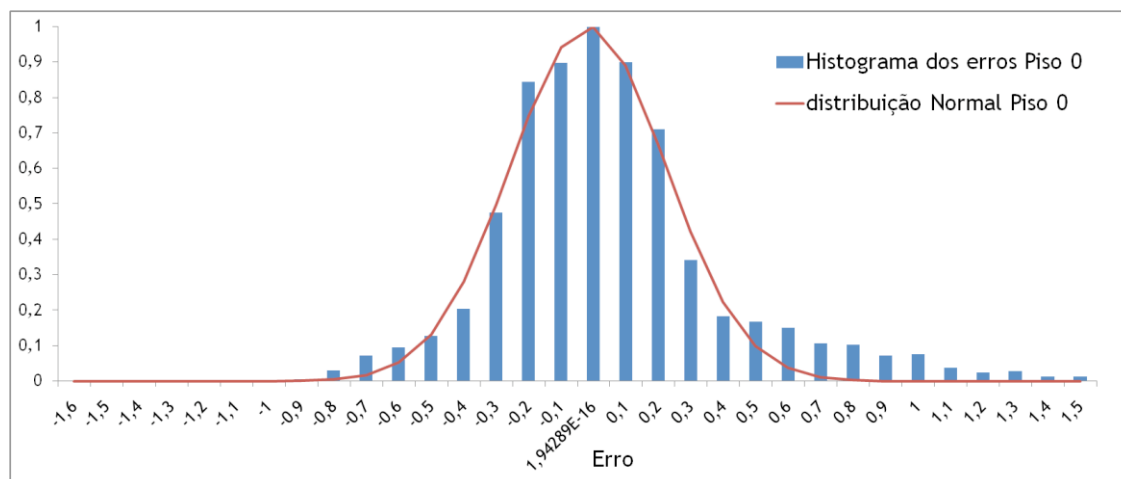


**Figura 4.3** - Exemplo do resultado de estimativa obtido através de regressão linear, para o consumo geral do piso 2.

Estando criado o modelo matemático (diferente para dias da semana, sábados e domingos) para o período de consumo de referência, procedeu-se a uma análise de erros, os erros foram calculados através da diferença entre os valores reais de treino do modelo e valores obtidos no modelo (real subtraído pelo modelo).

Tentou-se verificar se poderia existir alguma distribuição normal que explicasse bem a série de erros, obtiveram-se bons resultados, fazendo com que se tivesse usado distribuições normais para se determinar os intervalos de confiança de todos os modelos matemáticos (consumos gerais dos pisos 0 a 4).

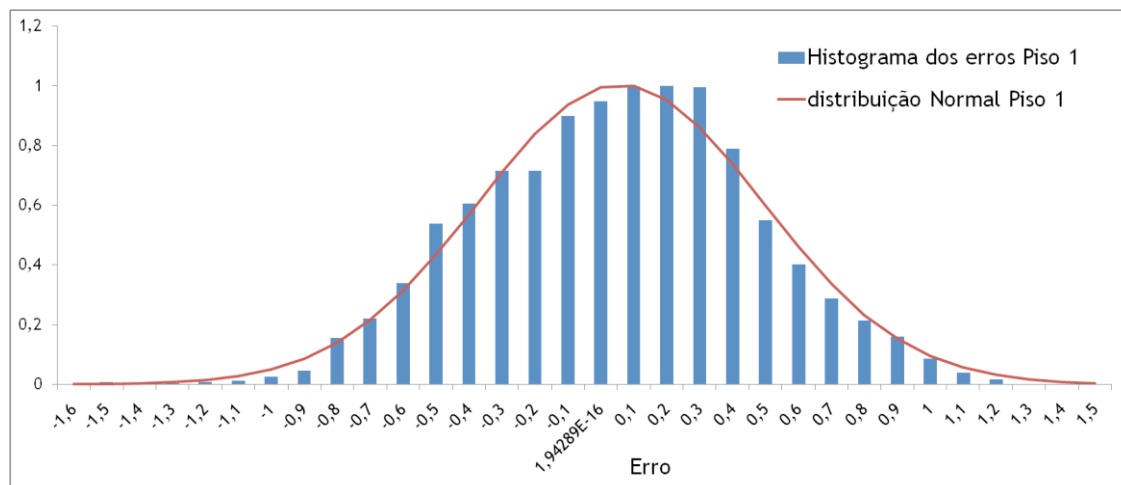
Foi no modelo matemático do piso 0 onde a sua distribuição de probabilidade dos erros estava mais longe de uma distribuição normal, tudo porque sistematicamente o modelo estava a expressar valores um pouco inferiores aos reais, o que fez com que se tivesse obtido uma distribuição de erros um pouco assimétrica, visível na Figura 4.4:



**Figura 4.4** - Resultado da optimização de uma função distribuição de probabilidade ao conjunto de erros associado ao modelo do consumo do Piso 0.

De uma forma geral, para os restantes pisos os histogramas de erros estiveram mais próximos de uma distribuição normal, mesmo que para o caso exemplificado acima os erros de aproximação sejam os maiores dos 4 modelos matemáticos, decidiu-se que mesmo assim poderiam ser desprezados.

Como exemplo de uma boa aproximação, pode-se ver na Figura 4.5 que os erros de aproximação são diminutos, fazendo com que o uso desta técnica possa ser aplicada neste caso de estudo, sem que se estejam a ignorar muitos erros de modelização.



**Figura 4.5** - Resultado de optimização de uma função distribuição de probabilidade ao conjunto de erros associado ao modelo do consumo do Piso 1.

Como mostrado na secção 3.3.3, depois de definida a curva normal, procedeu-se ao cálculo de vários intervalos de confiança para cada um dos cinco modelos matemáticos, intervalos com um passo de 5%, definidos entre 95% e 55%.

Como exemplo, para um intervalo de confiança de 80%, é calculada a função inversa da distribuição normal associada ao modelo matemático para as probabilidades de 5% (limite

inferior de erro) e de 95% (limite superior de erro). Na Tabela 4.1 pode-se ver os resultados dos intervalos de erros para alguns intervalos de confiança:

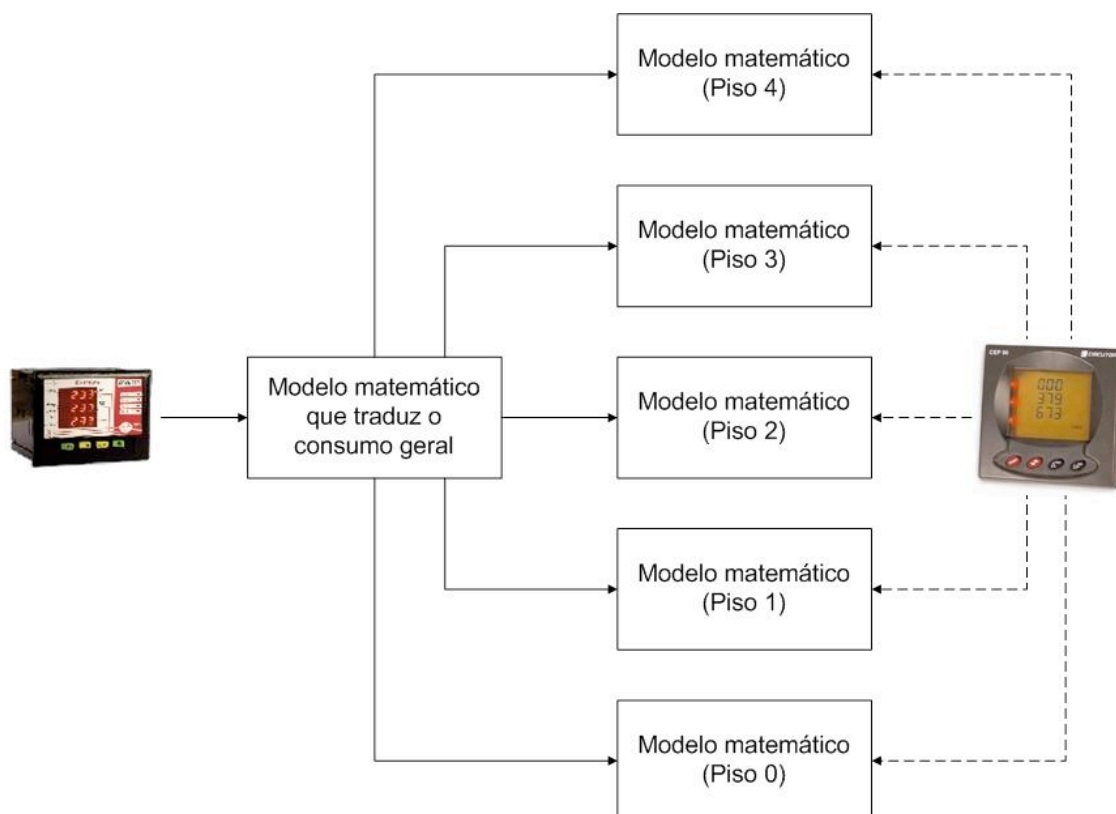
**Tabela 4.1** - Exemplo de intervalos de erro para vários intervalos de confiança, resultados do modelo matemático do consumo do Piso 2.

Intervalo de Confiança	Mínimo	Máximo
95%	-0,444559706	0,444942783
90%	-0,346326622	0,3467097
85%	-0,280049227	0,280432305
80%	-0,227374054	0,227757132
75%	-0,182183446	0,182566524
70%	-0,141600884	0,141983961
65%	-0,103995092	0,104378169
60%	-0,068310872	0,06869395
55%	-0,033785977	0,034169055

A título de exemplo, para um intervalo de confiança de 90% pode-se dizer que as poupanças serão calculadas com um erro está dentro do intervalo [-0,3463 kWh;0,3467kWh].

#### 4.2.1.3 Definição da forma como se verificam as poupanças energéticas

No que diz respeito à verificação das poupanças alcançadas, ter-se-á em conta que está apenas um aparelho de medição permanentemente instalado no edifício (este mede o consumo geral do edifício) e é usado outro aparelho móvel para verificar e calibrar os modelos de medição. Este aparelho será usado alternadamente para verificação do consumo de cada piso.



**Figura 4.6** - Esquema de ligações dos aparelhos de medição para o período de reporte, onde são determinados os ajustes aos modelos de acordo com os valores das variáveis independentes.

Neste exemplo de caso de M&V, ter-se-á uma unidade de medição móvel que irá registar e verificar alternadamente os consumos de cada um dos pisos, tem que estar instalada em cada um dos pisos pelo menos uma semana, visto que foi criado um modelo para os dias da semana, sábados e domingos. Esta metodologia é importante para se saber se é necessário fazer-se algum ajuste aos modelos matemáticos, para que se possa determinar as poupanças com o máximo de fiabilidade.

Visto que o período de reporte (período de tempo após aplicação da MRE até ao fim da vigência do contrato) dura vários anos, pode-se ter uma redução substancial de custos na redução de unidades de medição instaladas. Esta vantagem permite que alguns dos aparelhos de medição possam ser removidos assim que a MRE é aplicada e podem ser instalados em novos projectos, para ajudarem a definir outros períodos de reporte.

Cada um dos modelos matemáticos foi criado para que a partir do consumo geral do edifício, se saiba o consumo de cada piso, com um certo nível de incerteza, isto é, o consumo de um piso é obtido em função do consumo geral. Partindo desça característica, pode-se verificar um consumo de um piso, com a unidade móvel, e extrapolar esta medição para outro piso, invertendo as funções matemáticas que caracterizam as relações entre consumos.

## 4.3 Opção B do IPMVP

### 4.3.1 Cafeteria - Iluminação

Neste caso prático tentou-se criar um modelo matemático para o período de consumo de referência, o modelo foi criado tendo-se como base os dados registados por uma unidade de medição instalada a montante dos circuitos de iluminação da cafeteria. As medições foram feitas entre o dia 5 de Janeiro de 2009 e o dia 20 de Fevereiro de 2009. Considera-se que não há consumo de energia durante os fins-de-semana, uma vez que o estabelecimento está fechado durante esse período, salvo algum esquecimento da iluminação ligada ou necessidade de alguém visitar as instalações.

Analizando-se os diagramas diários dos circuitos de iluminação da cafeteria (Figura 4.7), verifica-se que há um conjunto de diagramas que se repetem<sup>14</sup>.

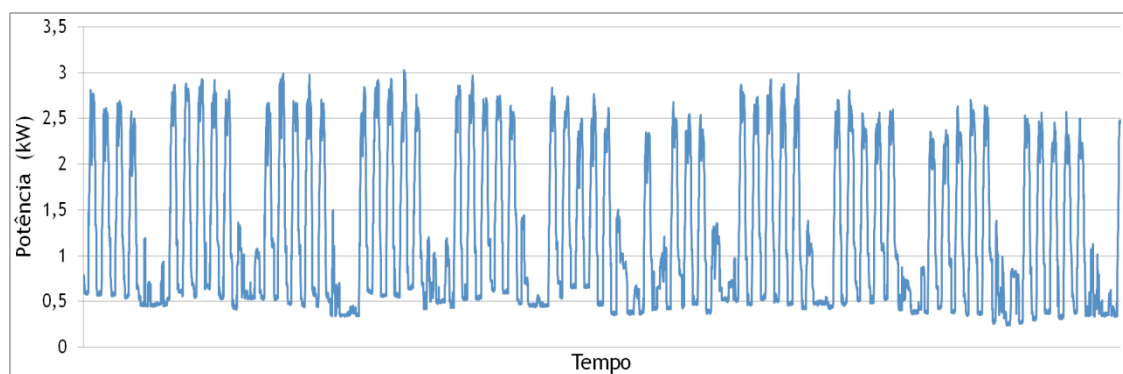
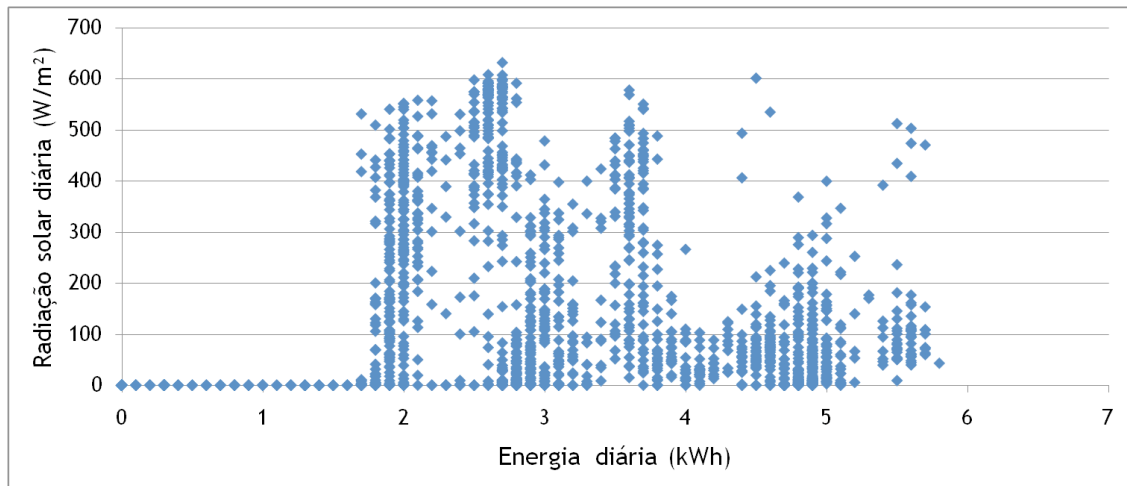


Figura 4.7 - Diagramas diários (dias úteis).

Todos os circuitos de iluminação apenas podem ser ligados manualmente, fazendo com que a correlação da potência com a radiação média não seja tão óbvia (correlação entre os valores de radiação média no plano horizontal e os valores de potência a cada 15 minutos):

<sup>14</sup> Os períodos do dia em que nunca há consumo de energia (23h15 as 6h45) e fins-de-semana não foram considerados para o modelo, visto não se registarem consumos nesses períodos, os modelos ficam simplificados e obtêm-se melhores resultados.

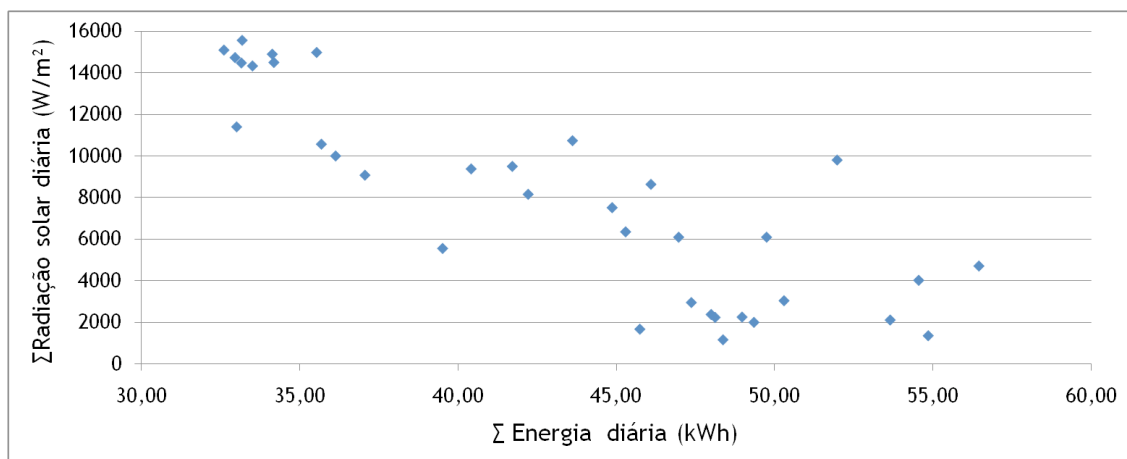




**Figura 4.8** - Correlação da radiação média com a potência (valores de cada 15 minutos).

A partir de uma estação meteorológica instalada a 100 metros da cafeteria, retiraram-se valores de radiação média horizontal a cada 10 minutos, os dados foram tratados por interpolação de forma a passarem a ser de 15 em 15 minutos e a partir daí calculou-se o somatório diário e determinou-se o valor máximo diário de radiação.

Como já foi referido, os circuitos só podem ser ligados manualmente, o que faz com que uma variação na radiação não produza uma variação rápida do consumo de energia. Por exemplo num dia nublado, há grandes variações no valor da radiação média, os utilizadores não iriam estar a ligar e desligar os circuitos de iluminação constantemente, fazendo com que por vezes o nível de radiação não reflecta o consumo energético. Por outro lado, se for analisados valores diários, consegue-se encontrar uma correlação mais forte. Verifica-se uma possível relação linear ou quadrática entre estas duas variáveis.



**Figura 4.9** - Correlação do somatório da radiação diária com a Energia consumida num dia.

Tendo em conta que há um conjunto de diagramas diários semelhantes (Figura 4.7) que se repetem e que o consumo de energia depende do valor da radiação, criaram-se entre três e seis diagramas típicos através da técnica de reconhecimento de padrões, os melhores

resultados foram obtidos com quatro grupos. Para se poder obter melhores resultados, os dados foram filtrados, ficando-se apenas com intervalos diários entre as 7h e as 22h e os fins-de-semana foram retirados. Foram escolhidos 34 pontos<sup>15</sup>. Estes dados foram inseridos no MATLAB e deste programa foram retirados os pontos centrais de cada cluster (Figura 4.10) e o nível de pertença de cada ponto a um determinado grupo - matriz das pertenças.

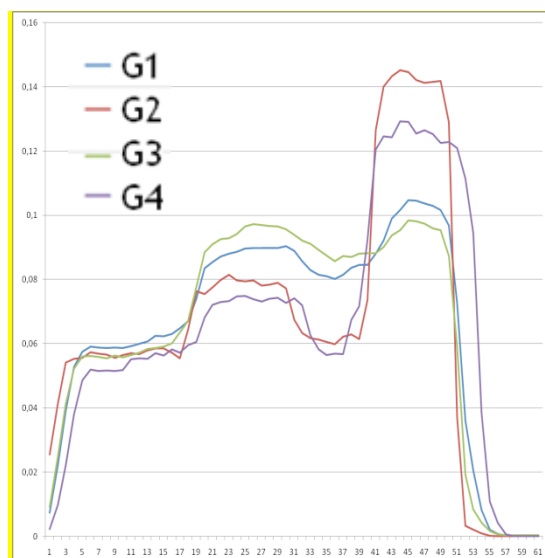


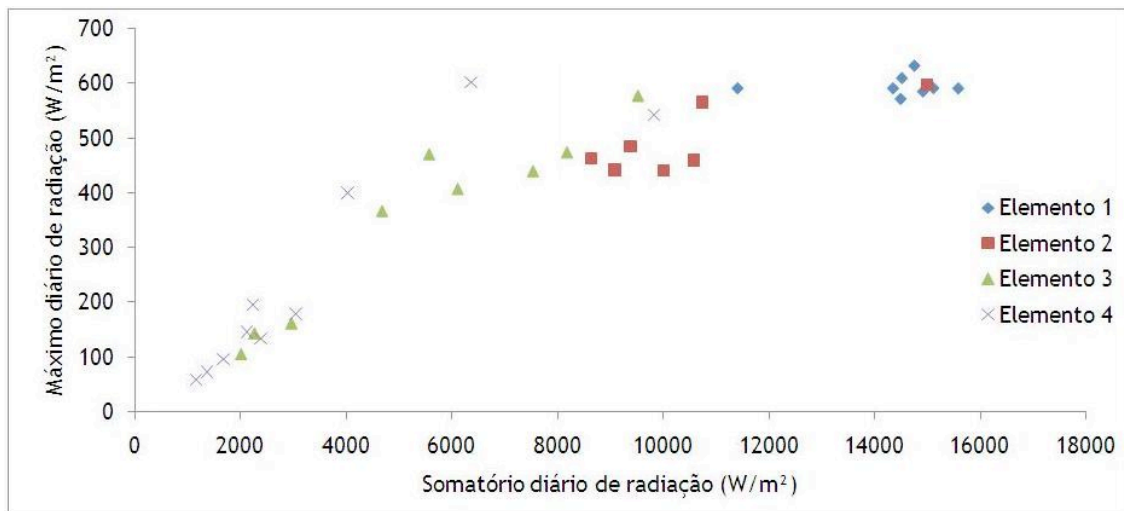
Figura 4.10 - Pontos centrais dos quatro grupos.

Através da matriz das pertenças, dividiram-se os pontos (dias) pelos quatro diferentes grupos, de acordo com o grau de pertença a cada um<sup>16</sup>.

Na Figura 4.11 pode-se verificar a disposição de cada dia relativamente ao pico diário de radiação e à radiação média diária.

<sup>15</sup> Cada ponto representa um dia, este ponto tem dimensão 61 que representa os intervalos de 15 minutos que se consideram (entre as 7h e as 22h).

<sup>16</sup> Cada ponto (dia) tem um valor de pertença a cada grupo, ficando este a fazer parte do grupo com maior valor de dependência.

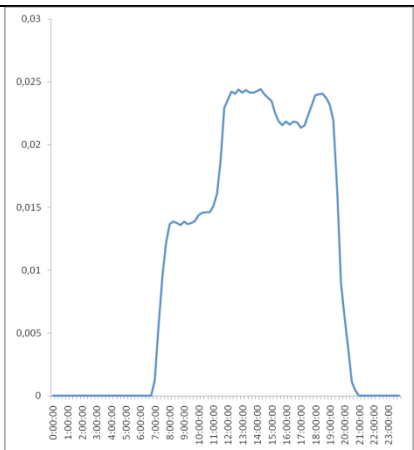


**Figura 4.11** - Relação entre o máximo de radiação e a radiação média de cada dia.

Os pontos estão agrupados de acordo com os melhores resultados obtidos através de reconhecimento de padrões<sup>17</sup> (4 grupos). A partir desta dispersão (Figura 4.11) decidiu-se criar um conjunto de regras, para se poder separar os diagramas em quatro grupos, ver Tabela 4.2.

Feita a divisão por grupos, passou-se à criação de formas de diagrama, que é um diagrama médio de todos os pontos pertencentes a cada grupo, obtendo-se uma forma para cada diagrama tipo, com área igual a 1.

Grupo 1 se o pico diário de radiação for inferior a  $200 \text{ W/m}^2$ :



<sup>17</sup> Cada tipo de ponto representa cada um dos quatro grupos.

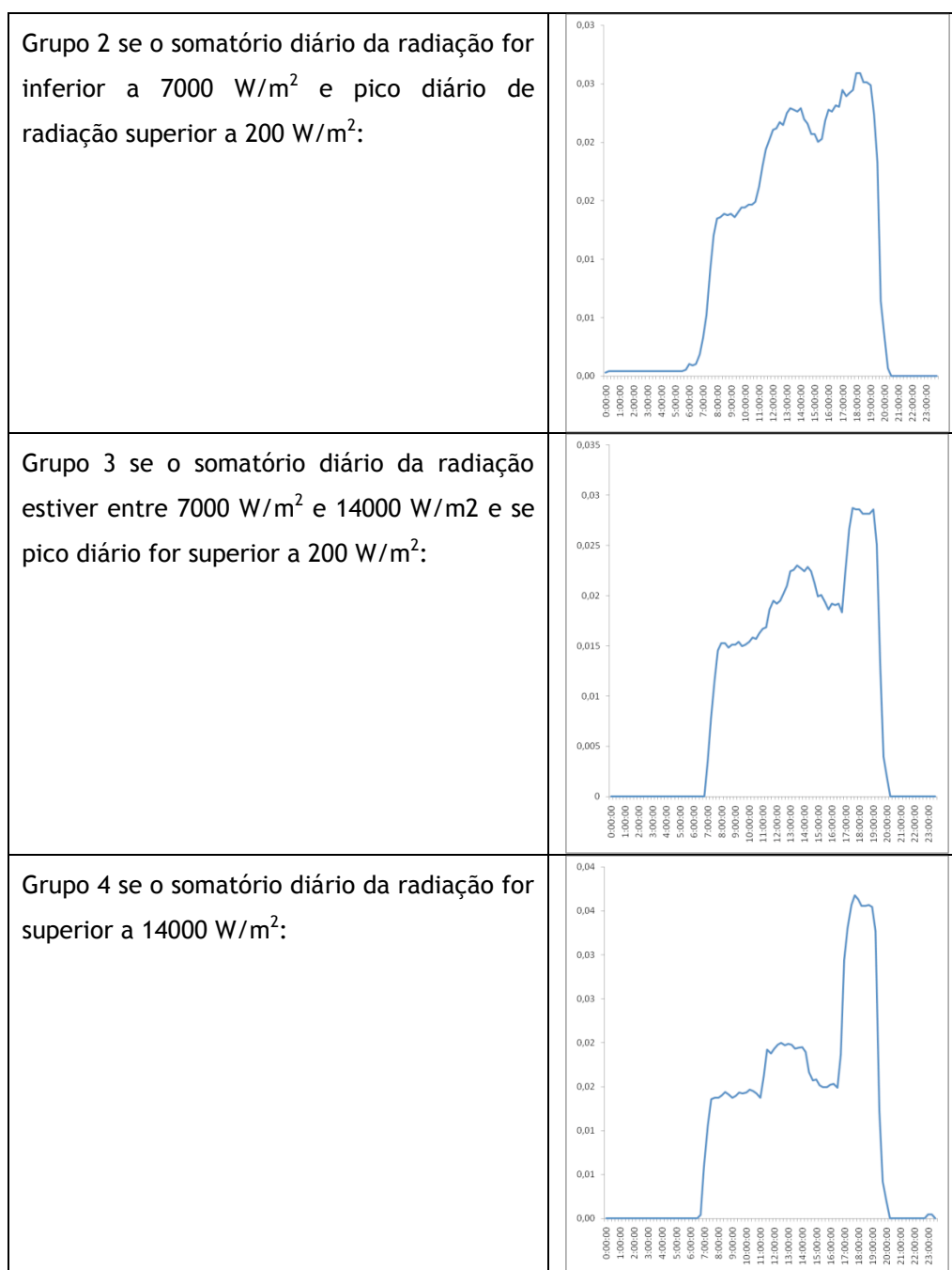


Tabela 4.2 - Diagramas tipo, obtidos a partir dos pontos centrais dos quatro grupos definidos.

Conforme os valores máximos de radiação e da radiação média de cada dia, é seleccionada uma determinada forma de diagrama, depois é calculada a energia consumida num dia segundo as seguintes funções:

- Grupo 1:  $Energia_{calc1} = -1,17 \times 10^{-3} \times \sum Radiação_{sol.méd.} + 52,20$
- Grupo 2:  $Energia_{calc2} = -4,12 \times 10^{-3} \times \sum Radiação_{sol.méd.} + 70,92$
- Grupo 3:  $Energia_{calc3} = -6,32 \times 10^{-3} \times \sum Radiação_{sol.méd.} + 107,84$
- Grupo 4:  $Energia_{calc4} = -6,61 \times 10^{-4} \times \sum Radiação_{sol.méd.} + 43,39$

Para finalizar o modelo, apenas basta multiplicar a forma do diagrama pela energia calculada.

Sumariamente o modelo matemático está descrito na Figura 4.12, onde, a partir de valores de radiação solar média de cada 15 minutos se consegue definir o consumo de energia a cada 15 minutos e o consumo de energia diário.

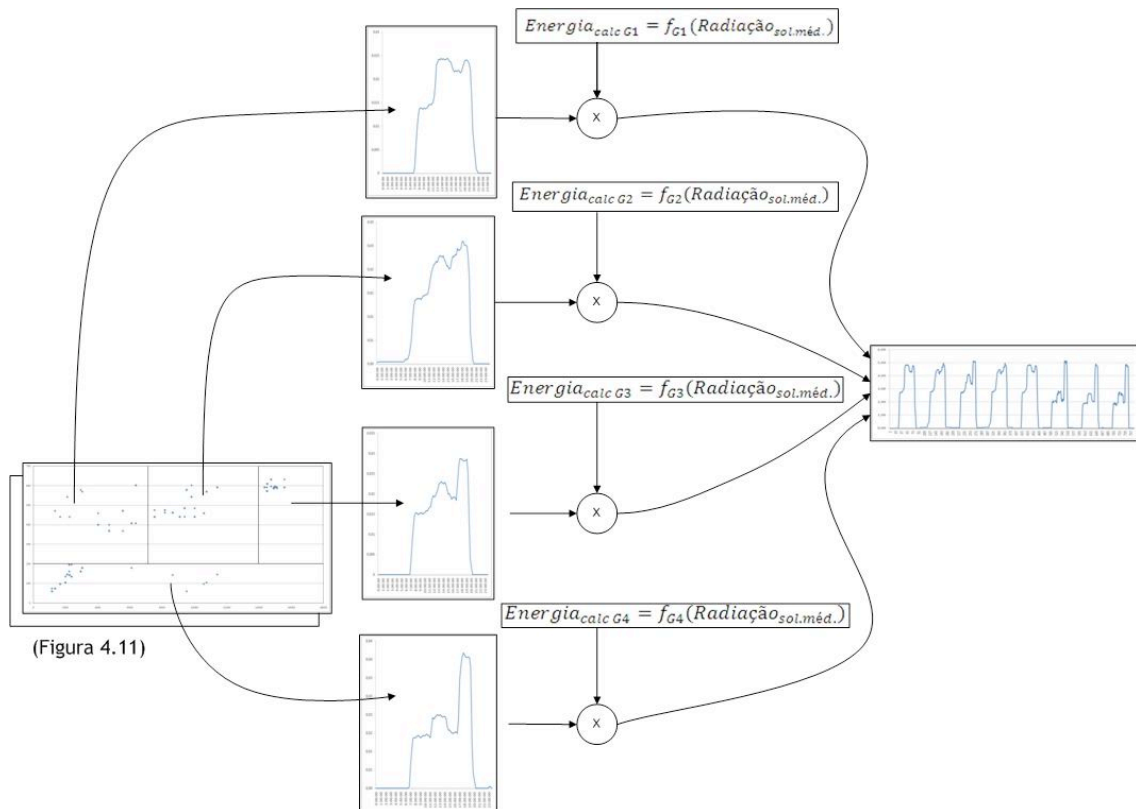
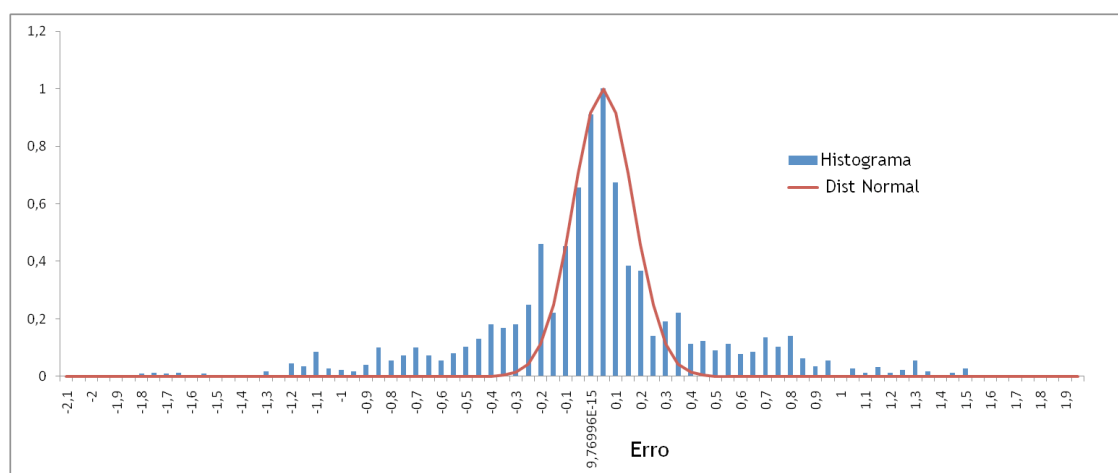


Figura 4.12 - Modelo matemático para o período de consumo de referência.

No que diz respeito as incertezas, seguindo uma análise exploratória de dados, inicialmente tentou-se usar uma distribuição Gaussiana para se poder determinar o nível de incertezas para os vários intervalos de confiança. Esta dificuldade pode ser facilmente identificada na Figura 4.13.



**Figura 4.13** - Histograma dos erros obtidos comparados com a função Gaussiana que melhor consegue explicar o problema.

Visto não se conseguir associar a série de erros a uma função normal de distribuição de probabilidade, teve que se recorrer aos quantis que são distribuições empíricas, permitem obter-se informação sobre a localização dos dados, ou seja, sobre a ordem de grandeza dos valores presentes na amostra.

Foram localizados os valores de erro que correspondem a cada 5% do percentil (ver Tabela 4.3).

**Tabela 4.3** - Resultados da aplicação da técnica de modelização de erros, clustering com um passo de 5%.

Percentil	Erro (kWh)	Percentil	Erro (kWh)	Percentil	Erro (kWh)
0%	-2,089461581	35%	-0,091625711	70%	0,103071159
5%	-0,856579498	40%	-0,057699743	75%	0,170982212
10%	-0,549970135	45%	-0,020736758	80%	0,258248442
15%	-0,39334798	50%	-0,007059932	85%	0,377175944
20%	-0,26395933	55%	0,008223882	90%	0,597996566
25%	-0,207889535	60%	0,034206525	95%	0,796564685
30%	-0,133802236	65%	0,064468532	100%	3,751673693

A partir destes resultados, obtêm-se os intervalos de confiança para toda a série de erros resultantes da aplicação do modelo matemático definido para o período de consumo de referência, os intervalos podem ser vistos na Tabela 4.4. Para cada intervalo de confiança está definido um intervalo de erro, por outras palavras, está-se a definir que para um determinado intervalo de confiança tem-se uma estimativa com um erro que pode oscilar entre um máximo e um mínimo.

**Tabela 4.4** - Tabela com os intervalos de erro para intervalos de confiança entre 95% e 55% com um passo de 5%.

Intervalo de Confiança	Mínimo (kWh)	Máximo (kWh)
95,0%	-0,85658	0,79656
90,0%	-0,54997	0,59799
85,0%	-0,39335	0,37718
80,0%	-0,26396	0,25825
75,0%	-0,20789	0,17098
70,0%	-0,1338	0,10307
65,0%	-0,09163	0,06447
60,0%	-0,0577	0,03421
55,0%	-0,02074	0,008224

A título de exemplo, para um intervalo de confiança de 90% tem-se a estimativa (equação (4.1)), expressa em kWh, que é igual o valor determinado através do modelo do período de consumo de referência mais um erro que está no intervalo compreendido entre [-0,54997kWh;0,59799kWh].

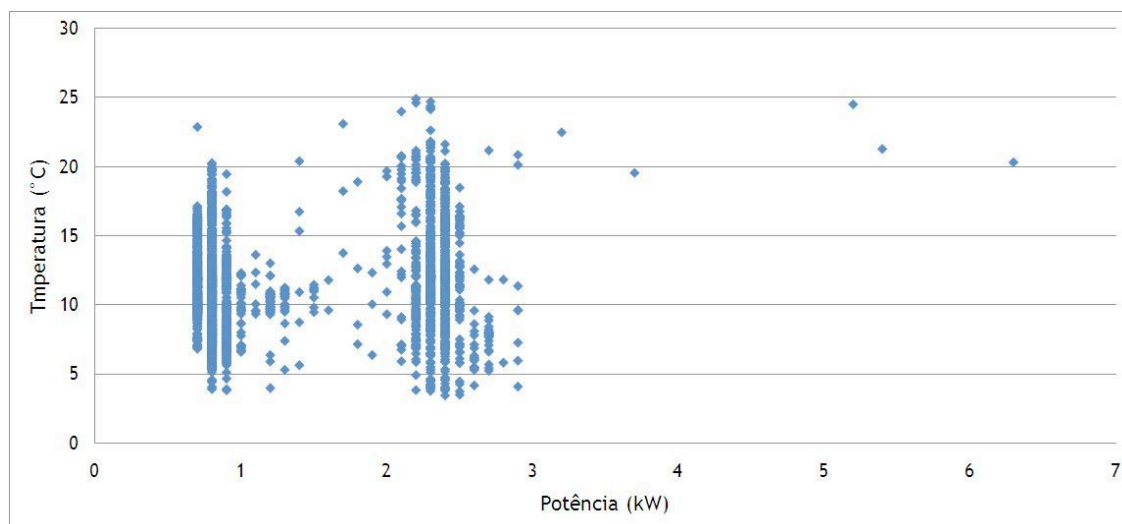
$$Estimativa = Modelo + [-0,54997; 0,59799] \text{ (kWh)} \quad (4.1)$$

#### 4.3.2 Cafeteria - AVAC

Neste caso prático tentou-se criar um modelo matemático para o período de consumo de referência, o modelo foi criado tendo-se como base os dados registados por uma unidade de medição instalada a montante dos circuitos de alimentação dos sistemas AVAC<sup>18</sup>. As medições foram feitas entre o dia 30 de Janeiro de 2009 e o dia 17 de Março de 2009. Considera-se que há consumo de energia durante a noite e fins-de-semana, mas estes períodos não dependem de nenhuma variável externa, por isso não são considerados no modelo. O aparelho de medição registou em alguns dias uns picos de potência de cerca de 20kW que foram filtrados, tal pico deve-se à entrada de serviço dos ventiloconvectores, estes são mensurados por outra unidade de medição sendo por isso ignorados.

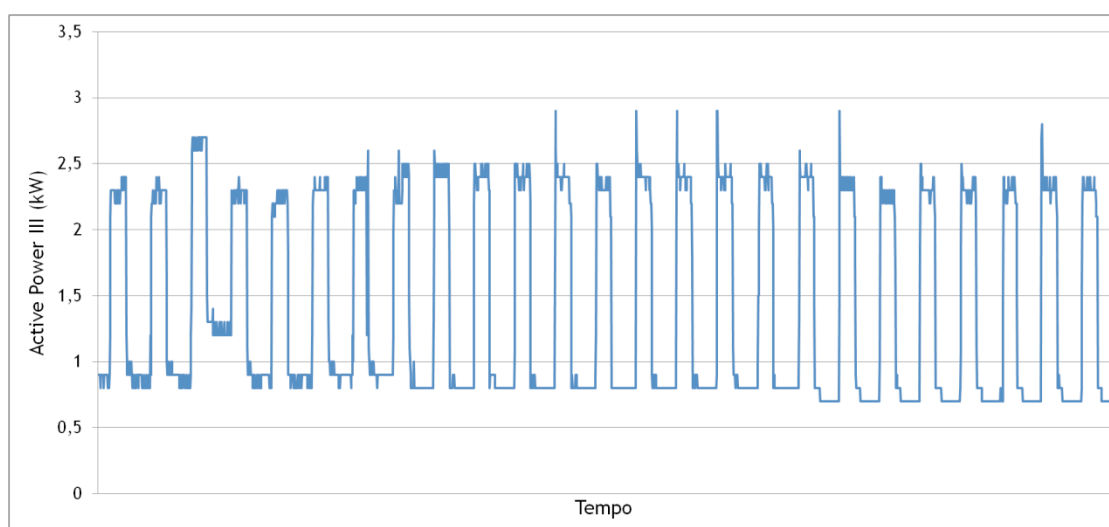
Verificou-se a dependência da potência activa trifásica com outras variáveis, sendo a mais importante a temperatura.

<sup>18</sup> AVAC significa aquecimento, ventilação e ar condicionado.



**Figura 4.14** - Correlação da temperatura com a potência activa trifásica.

Não se verificou uma dependência directa entre estas variáveis. Para o desenvolvimento deste modelo ignoraram-se fins-de-semana, os dias onde o sistema AVAC esteve desligado inexplicavelmente:



**Figura 4.15** - Valores de potência registados, nos dias úteis.

Visto que o diagrama diário não se altera muito ao longo do tempo, decidiu-se usar um modelo matemático muito simples. Este modelo não é nada mais do que um diagrama médio diário, ou seja, a cada 15 minutos determinou-se um valor médio da potência:



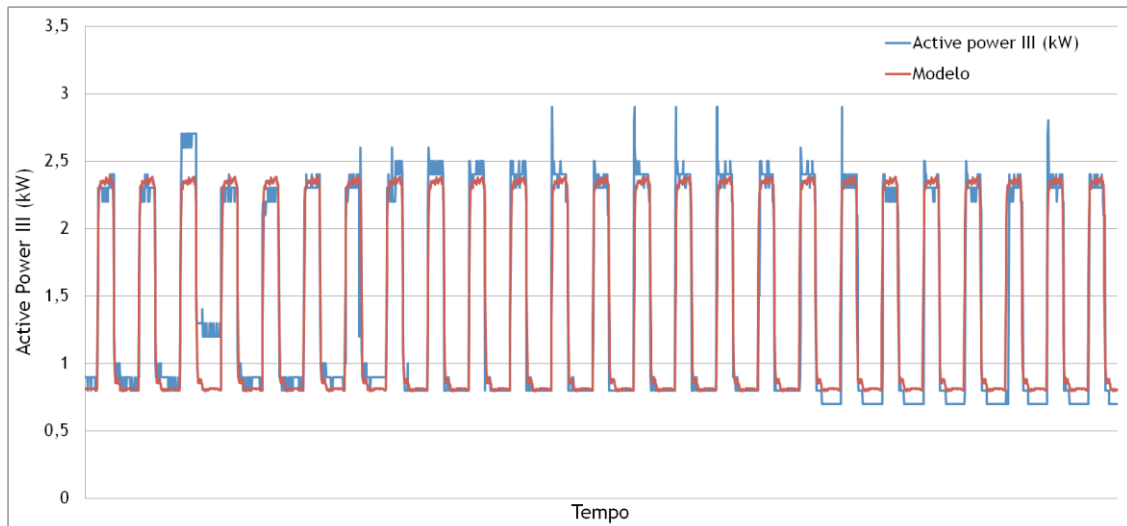


Figura 4.16 - Gráfico com os valores medidos de potência activa e com o modelo matemático.

A M&V tem como objectivo determinar com confiança a poupança de energia, para que as medidas de racionalização de energia possam ser de confiança precisam de ter um nível razoável de incerteza. Os erros são obtidos por simples comparação dos dados medidos com o modelo determinado. As incertezas foram calculadas segundo o apêndice B do IPMVP, para intervalos de confiança de 95%, 90% e 50%.

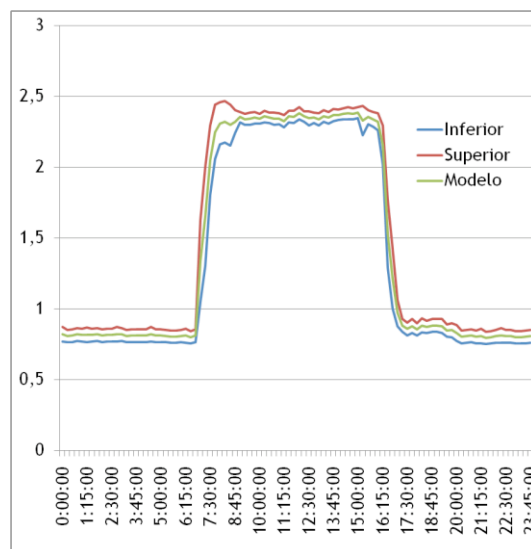


Figura 4.17 - Modelo matemático e incerteza para um intervalo de confiança de 95%.

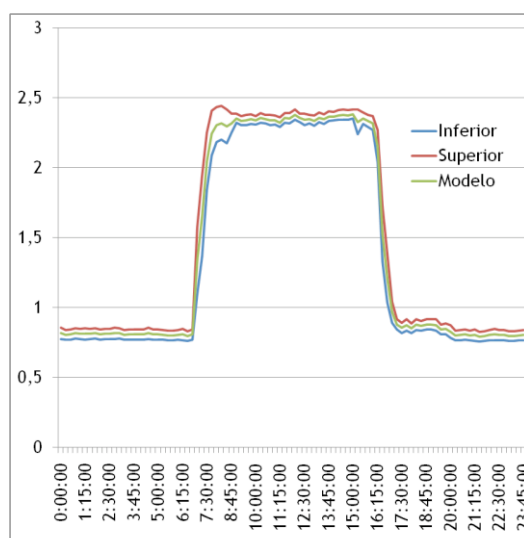


Figura 4.18 - Modelo matemático e incerteza para um intervalo de confiança de 90%.

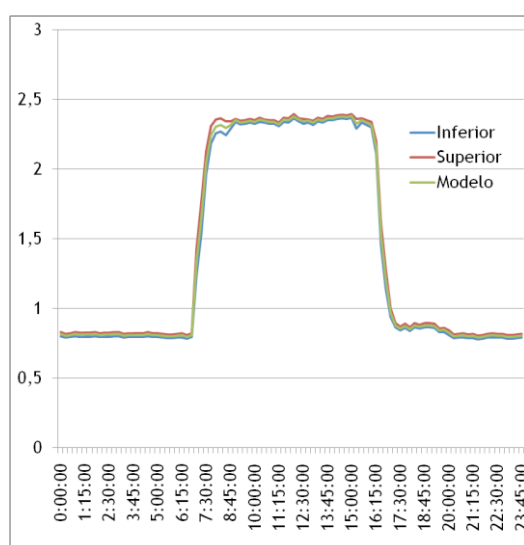


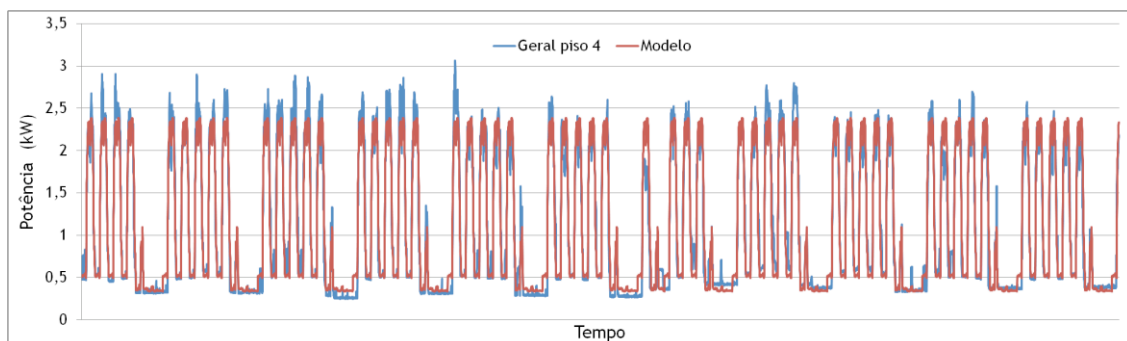
Figura 4.19 - Modelo matemático e incerteza para um intervalo de confiança de 50%.

### 4.3.3 Edifício de escritórios

A poupança é determinada pela medição no terreno do consumo de energia do sistema afectado pela medida de racionalização de energia. São usados aparelhos de medição: para registar os consumos gerais de todo o edifício, para os elevadores, para o AVAC geral e um por cada piso (ver Figura 1.1).

Como não foi verificadas quaisquer correlações com outras variáveis, decidiu-se usar como modelos matemáticos diagramas médios para cada aparelho de medição. Determinaram-se três diagramas diferentes para cada modelo: dias úteis, sábados e feriados e domingos. Foi criado um modelo que explicasse cada um dos consumos, com um ponto por cada quinze minutos.

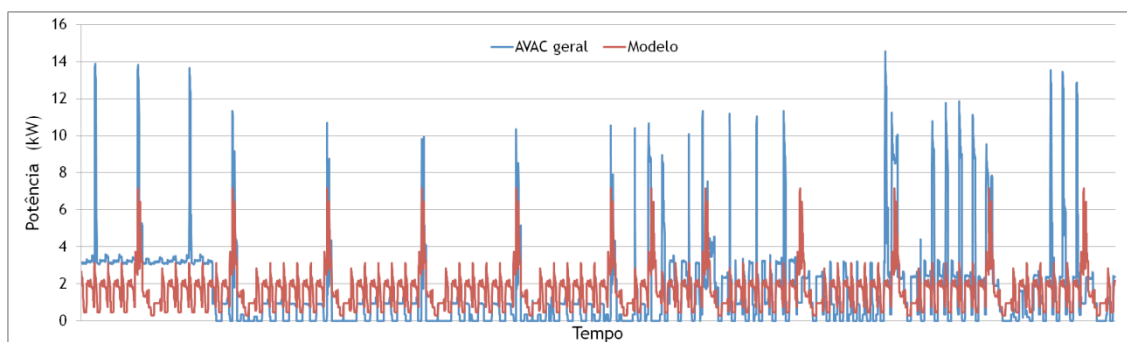
Para as séries de dados dos pisos 0 a 4, para os elevadores e para o consumo geral, o modelo matemático utilizado dá bons resultados, tal como é exemplificado na Figura 4.20. Todos estes modelos apresentam um baixo nível de incertezas.



**Figura 4.20** - Exemplo do resultado obtido através do modelo de diagramas médios, para o consumo geral do piso 4.

Mas para casos onde a série de dados não tem diagramas diários muito semelhantes, e associado à incapacidade de se conseguir relacionar com alguma variável explicadora, pode-se dizer que tem comportamentos inexplicáveis.

Por exemplo, o caso do AVAC Geral (ver Figura 4.21), que é onde há mais variações inexplicáveis, sabe-se que há a entrada de serviço de *chillers* de aquecimento e bancos de gelo (durante o período de medição)<sup>19</sup> e que estes têm que ser ligados e desligados manualmente, mas depois de ligados têm controlo automático de carga.

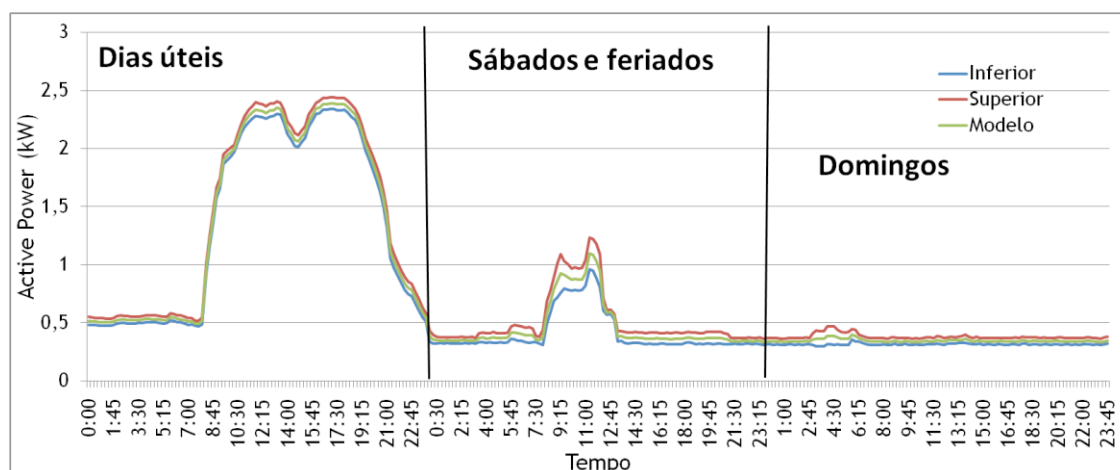


**Figura 4.21** - Exemplo do resultado obtido através do modelo de diagramas médios, para o consumo geral do sistema AVAC.

Os erros são obtidos através da comparação dos dados medidos com o modelo determinado. As incertezas foram calculadas segundo o apêndice B do IPMVP, para um intervalo de confiança de 90%. Na Figura 4.22 tem-se o resultado, em forma de gráfico, do nível de incertezas de cada um dos três diagramas para o piso 4, de notar que apesar do

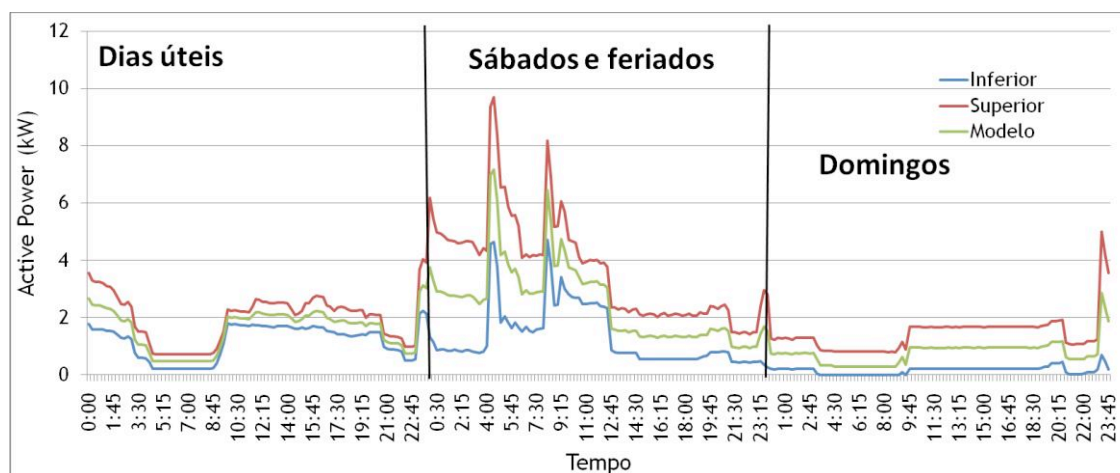
<sup>19</sup> Na parte inicial da série de dados vê-se um consumo base, devido ao funcionamento do *chiller* e na parte final vêm-se muitos picos de consumo devido à entrada de funcionamento dos bancos de gelo.

método de modelização ser básico, apresenta bons resultados, tudo porque a série de dados apresenta diagramas diários muito semelhantes. O modelo criado para tentar explicar os consumos gerais encontra-se num patamar intermédio, entre os dois casos exemplificados acima.



**Figura 4.22** - Valores de incerteza calculados para cada 15 minutos dos três diagramas determinados, para a série de dados extraída do medidor do consumo geral do piso 4.

De todos os modelos determinados, o do medidor do AVAC geral é o que apresenta um maior nível de incertezas (ver Figura 4.23) tudo porque não há hipótese de se criar um modelo mais complexo por não haver variáveis independentes capazes de explicar a variabilidade dos consumos energéticos.

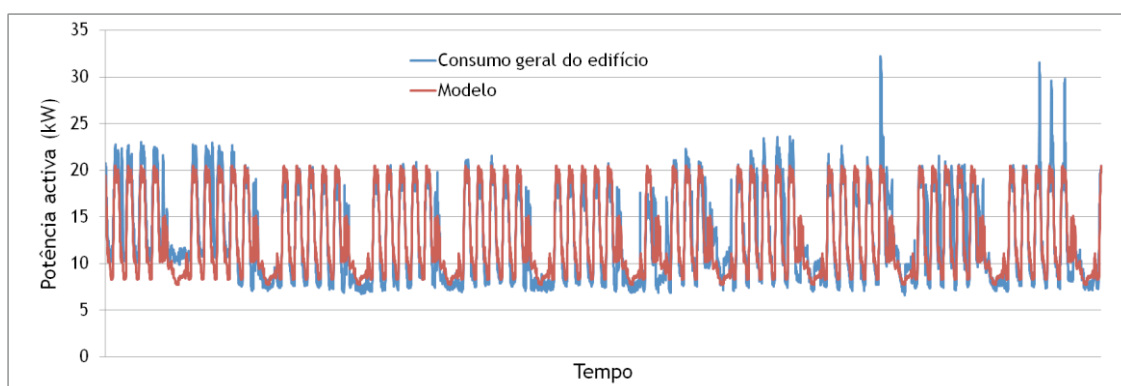


**Figura 4.23** - Valores de incerteza calculados para cada 15 minutos dos três diagramas determinados, para a série de dados extraída do medidor do consumo geral do sistema AVAC.

## 4.4 Opção C do IPMVP

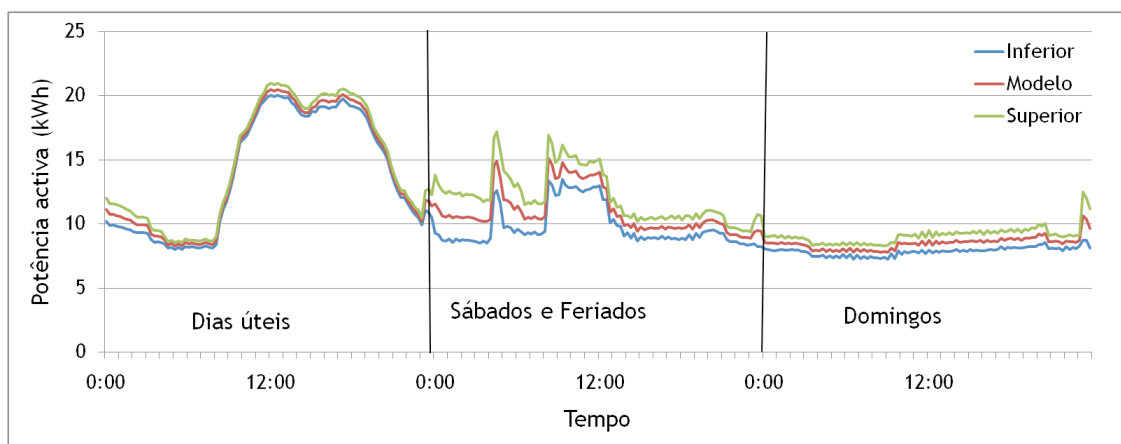
### 4.4.1 Edifício de escritórios

Neste caso prático é apenas usado um aparelho de medição para se obter informações sobre o consumo de todo o edifício. Como não foram verificadas quaisquer correlações com outras variáveis, decidiu-se criar um modelo matemático que é um conjunto de diagramas médios. Determinaram-se três diagramas diferentes: um para os dias úteis, outro para os sábados e feriados e outro para os domingos, com um ponto para cada quinze minutos do dia. Desta forma chegou-se ao modelo mostrado no gráfico da Figura 4.24.



**Figura 4.24** - Gráfico com o resultado obtido através do modelo de diagramas médios, para o consumo geral do edifício.

Os erros são obtidos através das diferenças entre os dados medidos e o modelo determinado. As incertezas foram calculadas segundo o apêndice B do IPMVP, para um intervalo de confiança de 90%.



**Figura 4.25** - Incertezas para os diferentes diagramas, com um intervalo de confiança de 90%.



## 5 Exemplos de casos de M&V - Período de reporte

### 5.1 Descrição

As poupanças são determinadas através da comparação do consumo anterior e posterior à implementação de uma MRE (medida de racionalização energética), fazendo-se os devidos ajustes.

Para se documentar bem o impacto da MRE, para além de se determinar um consumo de referência de energia é necessário proceder-se a ajustes<sup>20</sup>, de forma a isolar efeitos energéticos de factores externos. Um exemplo de um factor externo que poderia influenciar os cálculos das poupanças energéticas seria uma alteração dos períodos de funcionamento de um estabelecimento.

Os modelos determinados no capítulo 4 servem para que se possa determinar, com um certo nível de incerteza, um consumo de energia evitado. Neste capítulo mostra-se como os modelos devem ser calibrados face a possíveis flutuações nas variáveis independentes.

Aqui é apresentado um caso de estudo, onde foi aplicada uma medida de racionalização aos circuitos de iluminação do edifício de serviços (cafetaria e restaurante)<sup>21</sup>.

Para além das alterações de equipamentos e forma de funcionamento destes, é sugerido que se proceda à sensibilização dos utilizadores das instalações para as políticas de poupança de energia e, se necessário formação de técnicos responsáveis pela O&M (operação e manutenção) dos equipamentos.

---

<sup>20</sup> Se em alguns casos, estes ajustes não fossem feitos, ter-se-ia uma poupança calculada errada, dando origem a uma falta de informação acerca dos efeitos da MRE.

<sup>21</sup> Ver secção 4.3.1 para mais informações sobre o modelo matemático determinado para o período de consumo de referência.

## 5.2 Medida de Racionalização Energética

Nesta medida de racionalização energética procedeu-se ao melhoramento de todos os equipamentos dos circuitos de iluminação. A eficiência da iluminação não depende apenas da eficiência da lâmpada, mas depende também da eficiência da luminária e dos sistemas de controlo destas.

Procedeu-se à substituição das lâmpadas fluorescentes do tipo T8 (48 unidades) por lâmpadas fluorescentes T5, os balastros ferromagnéticos foram trocados por balastros electrónicos. As lâmpadas fluorescentes compactas (82 unidades) foram substituídas por lâmpadas LED.

Para que as poupanças fossem determinadas com o mínimo de incertezas possível, procedeu-se à calibração do modelo matemático do período de consumo de referência, de maneira a poder transpô-lo com fiabilidade para o período de reporte. Como mostrado na secção 4.3.1., apenas se dispõe de valores de radiação solar como variável independente, sendo os ajustes calculados apenas com base nestes dados.

Partindo apenas de valores de radiação solar, a cada 10 minutos<sup>22</sup>, consegue-se determinar com o modelo: uma forma de diagrama, uma energia diária consumida e valores de energia consumidos a cada 15 minutos.

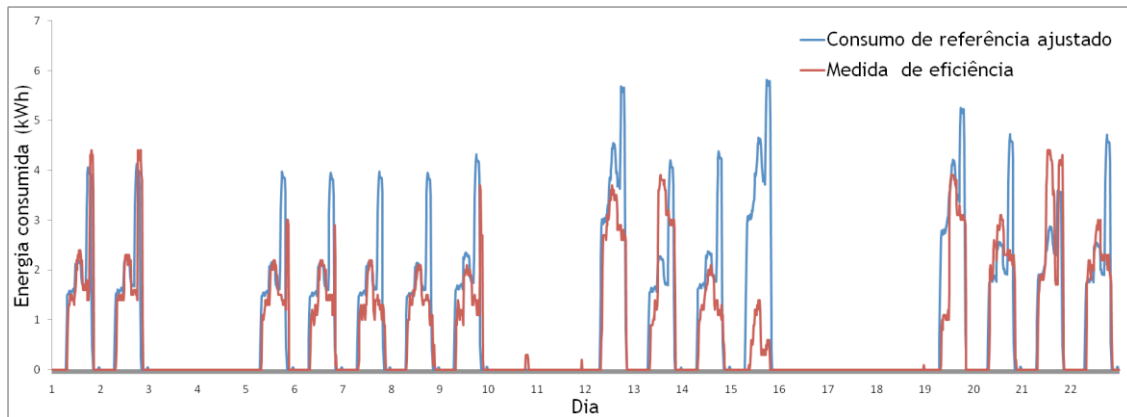
Com um programa em *Visual Basic* introduziram-se os dados de radiação obtidos a partir da estação meteorológica (um valor de radiação média a cada 10 minutos) e tem como saída valores médios de radiação a cada 15 minutos, calculado por interpolação linear. Procedeu-se ao cálculo do máximo e soma de radiação para cada dia. E com estes valores consegue-se calcular um consumo de energia para determinado dia e permite a determinação de uma forma de diagrama tipo, a partir das regras descritas na secção 4.3.1.

O último passo para a calibração do modelo consiste em gerar um diagrama diário de consumos energéticos, que consiste na multiplicação da forma de diagrama pela energia diária calculada. Para se verificarem as poupanças, este processo foi repetido para quase dois meses (50 dias).

---

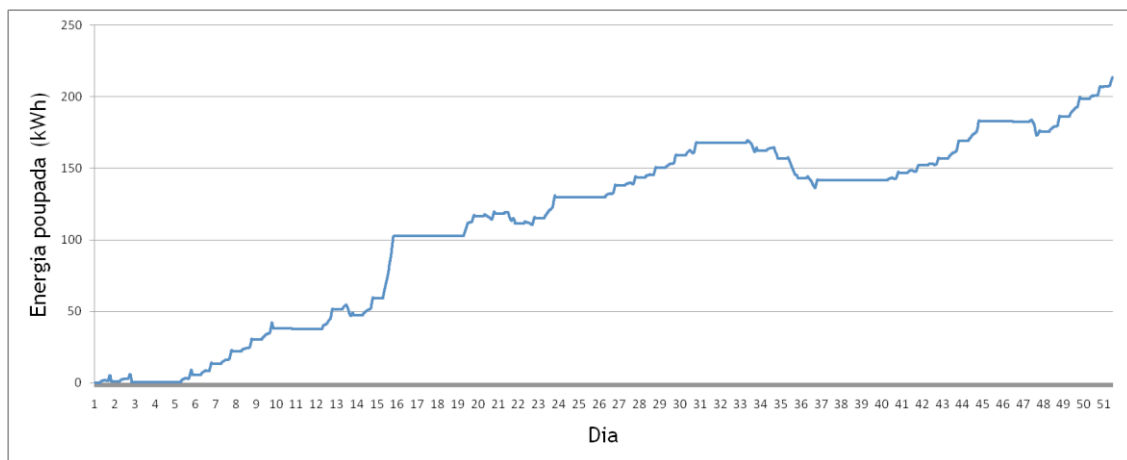
<sup>22</sup> A estação meteorológica apenas permite obtenção de dados de 10 em 10 minutos ou de hora a hora, sendo necessário fazer-se uma interpolação.





**Figura 5.1** - Exemplo ilustrativo dos resultados obtidos na medida de racionalização energética.

Na Figura 5.1 pode-se verificar os resultados da MRE para os primeiros vinte e dois dias de funcionamento. Nos fins-de-semana e feriados não há consumos energéticos registados, salvo algumas excepções<sup>23</sup>. Já na Figura 5.2 pode-se observar o acumular das poupanças energéticas, os dias onde não há variação nas poupanças são fins-de-semana e feriados. Verifica-se que nem em todos os dias houve uma poupança energética efectiva, tal facto pode ser justificado pelo controlo manual dos circuitos ou por influências de factores alheios ao modelo.



**Figura 5.2** - Gráfico com a quantidade de energia poupada após aplicação da MRE.

Estando o modelo matemático devidamente ajustado e o nível de poupanças definido, deve-se definir um intervalo de confiança<sup>24</sup> e com este definir-se um intervalo admissível de erro. Na Tabela 4.4 estão determinados os intervalos de erro para este modelo matemático e na secção 4.3.1 está descrita a forma como se determinaram estes erros.

<sup>23</sup> Como excepções pode-se ter uma visita às instalações fora do período de funcionamento ou o esquecimento de algum circuito de iluminação ligado.

<sup>24</sup> Tipicamente escolhe-se um intervalo de confiança de 90%, mas diferentes intervalos podem ser definidos, dependendo do tipo de MRE e da distribuição de erros.

Integrando a energia consumida ao longo do tempo, obtém-se a quantidade de energia poupada, tal como se pode ver na Figura 5.2, conseguem-se poupar 855,72kWh, sendo consumidos 3154,55kWh no mesmo período. Através do modelo do período de consumo de referência, devidamente calibrado, determinou-se que se podia ter consumido (se a MRE não tivesse sido aplicada) 4010,27kWh. Com estes resultados, calculou-se as diferenças entre consumos e verificou-se uma poupança de 21,34%.

Para esta estimativa, em que se tem um acumulado de poupanças, não se pode aplicar os modelos de incertezas. Isto deve-se à propagação de erros e dependência entre estes, tornando-se uma análise complexa.

Usando-se o modelo de incertezas determinado na secção 4.3.1, pode-se dizer que para um intervalo de confiança de 90%, tem-se um erro dentro do intervalo  $[-0,54997; 0,59799]$  kWh. Este valor de erro médio é para cada medição, ou seja, para cada um dos intervalos de 15 minutos.

Adicionalmente foi elaborado um Plano de Medição e Verificação que respeita os 13 tópicos comuns às quatro opções do IPMVP mais dois tópicos exclusivos da opção A, definidos na secção 2.5.3. O plano de M&V pode ser consultado nos anexos (ver secção 7.1).

## 6 Conclusões

As medidas de racionalização energética consistem num conjunto de acções e medidas que têm como objectivo uma utilização racional de energia. Estas medidas são cada vez mais um factor importante de economia energética e redução de custos, em todos os sectores económicos.

Tendo em conta um conjunto de alterações e substituições de equipamentos e sensibilização de utilizadores das instalações, é possível reduzir-se os consumos energéticos mantendo o conforto e a produtividade das actividades dependentes de energia.

O custo da Medição & Verificação cresce proporcionalmente com o detalhe com que os modelos matemáticos são criados. Deve ser lembrado que o objectivo da M&V é determinar com confiança a poupança de energia. Um modelo mais detalhado pode proporcionar muitas vantagens ao nível do valor das poupanças esperadas bem como ao nível do controlo dos factores que influenciam o consumo energético. Relativamente a um modelo matemático que contempla apenas um valor diário de consumo energético, um modelo mais detalhado permite identificar, por exemplo, se existiram algumas alterações comportamentais ou de disponibilidade:

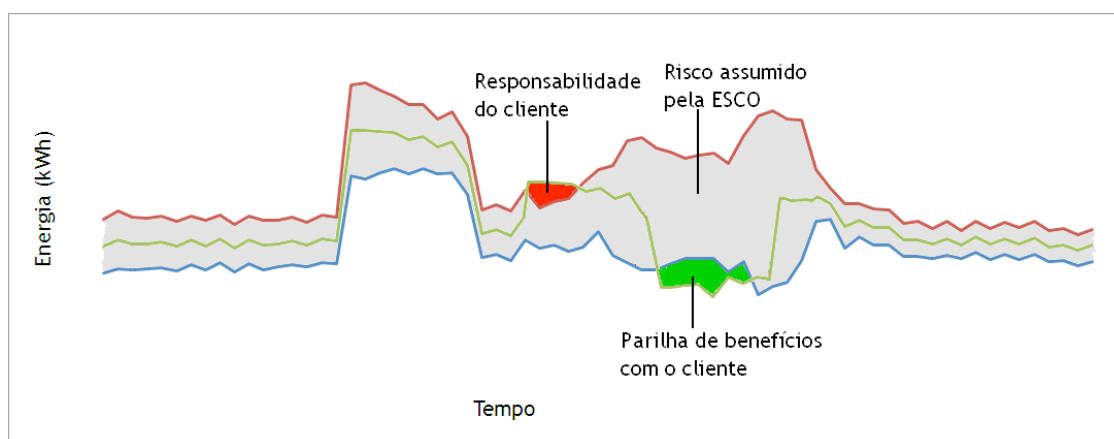
- Ajuste da perda de disponibilidade de um circuito de iluminação ou de uma luminária;
- Ajuste do esquecimento de circuitos de iluminação;
- Alterações comportamentais;
- Detecção de anomalias;
- Detecção de comportamentos erráticos;
- Oportunidade de criar competitividade entre utilizadores, de maneira a aumentar as poupanças (opção C vs. Opção B do IPMVP);
- Detecção de avarias e anomalias.

Por exemplo, numa determinada instalação, aos domingos nunca se registou consumos de energia, ficando definido que antes e depois de se aplicar a MRE o consumo é

nulo. Se no período de reporte, se registar um consumo energético, o cliente tem que ser penalizado por esse consumo extra de energia.

Com o estudo das várias opções de M&V, o contacto com diferentes tipos de consumos de electricidade e com edifícios com características distintas, permitiu o desenvolvimento de um sistema de apoio à medição e verificação do desempenho energético. O principal objectivo do desenvolvimento desta ferramenta foi de proporcionar apoio à decisão da melhor abordagem a seguir perante uma determinada medida de racionalização energética.

Como é sabido, um bom modelo matemático explicativo dos consumos energéticos tem que ter também associado um modelo de incertezas que traduz convenientemente a distribuição de erros. Com o objectivo de permitir a distribuição de responsabilidades, as incertezas podem ser ajustadas na negociação. A ESCO assume o risco de os consumos não apresentarem incertezas superiores às calculadas (zona a sombreado da Figura 6.1), se superiores, o cliente sofre penalizações, se inferiores, o cliente é beneficiado.



**Figura 6.1** - Exemplo ilustrativo das incertezas calculadas e risco assumido por parte da ESCO.

A M&V tem como grande objectivo determinar com fiabilidade as poupanças de energia, por esta razão é exigível que os relatórios de poupança tenham um bom nível de incerteza. Para que uma poupança de energia possa ser estatisticamente válida, esta deve ser expressa em conjunto com os seus intervalos de confiança.

Um bom sistema de Medição e Verificação permite usar da melhor forma as informações disponíveis evitando a necessidade de aquisição de equipamentos de medição suplementares, porque em muitos casos o conhecimento de uma única variável independente permite explicar múltiplos fenómenos.

Existe a necessidade de ferramentas sistemáticas de forma a evitar tempo e recursos de análise.

A incerteza revelou-se importante para a definição das cláusulas contratuais, para a definição da partilha de benefícios e de forma a permitir a detecção de avarias ou anomalias de consumo. Um exemplo de uma anomalia está presente na Figura 6.2.

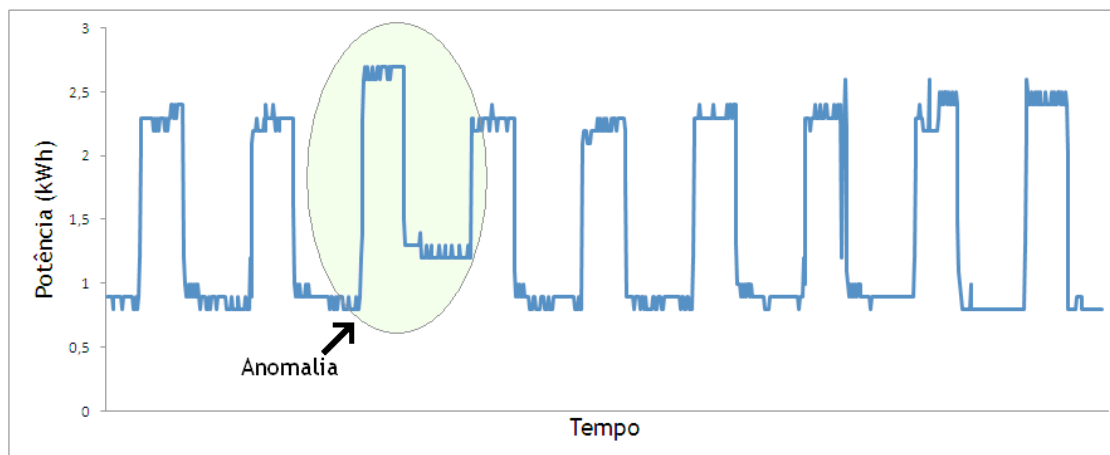


Figura 6.2 - Exemplo de uma anomalia registada por uma unidade de medição.

O processo de M&V também poderá servir para a detecção de potencial de poupança subaproveitada, por exemplo no edifício de escritórios, apesar de ter uma boa iluminação natural, não foi detectada qualquer correlação entre a energia consumida e a radiação solar. Isto leva a perceber que o recurso de iluminação natural não está a ser utilizado.

Para a criação dos modelos matemáticos foram abordadas as redes neuronais, esta técnica não resultou viável. Para que as redes neuronais pudessem funcionar, seria necessário ter toda uma gama de valores de radiação admissíveis. Deveria existir pelo menos um ano completo de dados para que a rede neuronal captasse uma base de conhecimento completa. Como apenas estavam disponíveis alguns meses de dados, as redes neuronais apresentavam um mau desempenho quando aplicadas num mês com características ou radiação diferente. Fica apenas a nota que para trabalhos futuros, esta técnica deverá ser explorada, certamente captará todas as particularidades e influências entre variáveis, permitindo uma fácil sistematização do processo.

Como futuros trabalhos, propõe-se criar um sistema de gestão de consumos energéticos, que funcionando em conjunto com o aparelho de medição, permita a detecção de consumos energéticos anómalos e proceda automaticamente a ajustes à poupança efectiva, atribuindo responsabilidades pela diferença de consumos.

Para um edifício de escritórios com vários pisos e com pequena variabilidade no número de utilizadores poder-se-á desenvolver uma ferramenta que regista os consumos e alguns parâmetros auxiliares. Isto permitirá a implementação de planos comportamentais em que se possa criar um clima de competitividade entre utilizadores de pisos diferentes, de

maneira a promover-se a eficiência energética. Este esquema é já usado por algumas empresas no incentivo à poupança no número de impressões.

Uma boa forma de dar uso à interessante característica de detecção de alterações de disponibilidade é definir-se um sistema de detecção de anomalias. Este sistema de gestão pode enviar um sinal de alarme ao responsável pela monitorização, tendo a possibilidade de rapidamente poder eliminar as anomalias e avarias.

## Referências

- [1] *International Performance Measurement and Verification Protocol*. Vol. 1. 2007: Efficiency Valuation Organization. 134.
- [2] *Super ESPC - Energy Savings Performance contracting*, U.S. Department of Energy.
- [3] Vine, E.L., *The monitoring, evaluation, reporting, verification, and certification of energy-efficiency projects*. Mitigation and adaptation strategies for global change, 2000. 5(2): p. 189.
- [4] EDP. *ECO - Programa de Eficiência Energética EDP*. Maio de 2009; Available from: [http://www.eco.edp.pt/pt/eficiencia\\_energetica/lista.aspx](http://www.eco.edp.pt/pt/eficiencia_energetica/lista.aspx).
- [5] Schipper, L., et al., *Energy efficiency and human activity: past trends, future prospects*. Energy efficiency and human activity: past trends, future prospects, 1992.
- [6] DGEG. *Direcção Geral de Energia e Geologia*. Junho de 2009]; Available from: <http://www.dgge.pt/>.
- [7] *Introdução ao uso da medição e verificação de economias de energia no Brasil*, I.N.d.E. energética, Editor. 1997: Rio de Janeiro.
- [8] Cowan, J., *Measurement & Verification, Why?, How?, planning issues*. 2009: Lisbon.
- [9] *Plano de acção para a Eficiência Energética (2007-2012)*. Junho 2009.
- [10] *Resolução do Conselho de Ministros nº80/2008*, Diário da República. p. pp. 2824 - 2865.
- [11] Péricles pinheiro, A.P., *Porque o M&V é importante e como isto pode ser incorporado no mercado brasileiro*, ABESCO, Editor.
- [12] Haberl, J., Turner, W.D., Finsstad, C., Scott, F. and Bryant, J, *Calibration of Flowmeters for use in HVAC Systems Monitoring*. 1992.
- [13] Kats, G., Kumar S., Rosenfeld, A., *The Role for an International Measurement & Verification Standard in Reducing Pollution*. Vol. 1. 1999.
- [14] Comission, E., *Energy Efficiency potential in buildings, barriers and ways to finance projects en New Member States and Candidate Countries*.

- [15] Motiva, *International Review of ESCO-activities*. 2005. p. 48.
- [16] Efficiency Valuation Organization. 2008 June 2009]; Available from: [http://www.evo-world.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=40&Itemid=146](http://www.evo-world.org/index.php?option=com_content&task=view&id=40&Itemid=146).
- [17] Wayne C. Turner, W.H., *Energy management handbook*. 2004. p. 856.
- [18] *International Performance Measurement & Verification Protocol: Concepts and Practices for Improved Indoor Environmental Quality, Volume II*. 2001: DIANE Publishing.
- [19] Efficiency Valuation Organization. 2008 April 2009]; Available from: [http://www.evo-world.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=272&Itemid=279](http://www.evo-world.org/index.php?option=com_content&task=view&id=272&Itemid=279).
- [20] Peter C. Fusaro, M.Y., *Green Trading markets: developing the second wave*. 2005: Elsevier.
- [21] EERE. *EERE: Federal Energy Management Program Home Page*. 2009 04/30/2009 June 2009].
- [22] Capehart, B.L., *Encyclopedia of energy engineering and technology*. Vol. 3. 2007.
- [23] *M&V Guidelines: Measurement and verification for Federal Energy Projects*. 2008, U.S. Department of Energy.
- [24] *M&V Guidelines: Measurement and verification for Federal Energy Projects*. 2000, U.S. Department of Energy.
- [25] *Guide de la Mesure et de la Vérification Pour les Services de le Efficacité Énergétique*. 2008, Club Des Services D'Efficacité Énergétique: Paris.
- [26] Claridge, D., Haberl, J., Bryant, J., Poyner, B. and McBride, j., *Use of energy Management and Control Systems for Performance Monitoring of Retrofit Projects*. 1994, Texas A&M University.
- [27] Waltz, J.P. *Management, measurement & verification of performance contracting*. Illustrated 2003.
- [28] Fredj, K., *Handbook of sustainable development planning: Studies in modelling and decision support*. CANADIAN JOURNAL OF DEVELOPMENT STUDIES-REVUE CANADIENNE D ETUDES DU DEVELOPPEMENT, 2005. 26(4): p. 890-891.
- [29] Jain, A.K., M.N. Murty, and P.J. Flynn, *Data Clustering: A Review*. 1999. p. 264.
- [30] Tarek M. Sobh, K.E., SpringerLink, *Advances in Systems, Computing Sciences and Software Engineering*. 2006.
- [31] Albert Thumann, W.J.Y., *Handbook of energy audits*. 7 ed. 2008.
- [32] Ali Malkawi, G.A., *Advanced building simulation*. 2004.
- [33] Hansen, S.J., *Performance contracting*. 2 ed. 2006. 332.
- [34] Albert Thumann, F.W., *Financing Energy Projects Deskbook*. 1997.



- [35] NAESCO. *Resources - What is an ESCO?* Junho de 2009]; Available from: <http://www.naesco.org/resources/esco.htm>.
- [36] Fawkes, S., *Outsourcing energy management: saving energy and carbon through partnering*. 2007: Gower Publishing, Ltd., 2007.
- [37] P. Bertoldi, B.B.-K., and S. Rezessy, *Latest Development of Energy Service Companies across Europe*.
- [38] *Arizona department of commerce - ESPC*. 2009 [cited 2009 Junho]; Available from: <http://www.azcommerce.com/Energy/ESPC.htm>.
- [39] *ESPC's, Greening EPA, US EPA*. 2009 [cited 2009 Junho]; Available from: <http://www.epa.gov/greeningepa/energy/espc.htm>.
- [40] *Patriot Energy Savings Corporation*. 2009 [cited 2009 Junho]; Available from: <http://www.patriotenergy.us/howwedoit.html>.
- [41] Paulo Roberto Vampré Hummel, P.R.V.H.N.E.P., *Matemática financeira e engenharia econômica*. 2003.
- [42] *Protocolo Internacional de Medição e Verificação do Desempenho Energético*. Vol. 1. 2007: Efficiency Valuation Organization. 134.
- [43] Albert Thumann, E.A.W., *Handbook of financing energy projects*. 2005: The Fairmont Press, Inc., 2005. 432.
- [44] Ferguson, R.M., *Climate change 2007: mitigation of climate change: contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Choice: Current Reviews for Academic Libraries, 2008. 45(9): p. 394.



## 7 Anexos

### 7.1 Planos de Medição e Verificação (Cafetaria - Iluminação)

**Opção IPMVP:** A

**Data:** Abril 2009

**Versão:** A.2

**Critérios:**

- Período de reporte: 3 anos;
- Intervalo de confiança: 90%.

**Instalação:** Circuitos de iluminação da cafeteria/restaurante

**Utilidade:** Iluminação

**Técnico responsável:**

**Empresa de serviços energéticos:**

**Objectivo da MRE:** Melhoria da eficácia energética dos circuitos de iluminação da cafeteria/restaurante. A poupança obtida através da MRE será calculada tendo como base o valor da radiação média solar, medida a cada 15 minutos, numa estação meteorológica próxima da instalação. Neste projecto serão implementadas várias medidas de eficiência energética na iluminação artificial:

As lâmpadas fluorescentes do tipo T8, com balastros ferromagnéticos serão substituídas por lâmpadas fluorescentes do tipo T5 com balastro electrónico e as lâmpadas fluorescentes compactas serão substituídas por lâmpadas LED.

**Opção do IPMVP seleccionada e limite de medição:** Foi seleccionada a opção A, Volume I do IPMVP, EVO 10000-1:2007. A medição encontra-se limitada aos circuitos de iluminação da instalação. Os efeitos interactivos são uma redução de carga térmica do edifício. No âmbito das medidas de eficiência a implementar, estes efeitos são considerados como insignificantes.

**Referência; Período, energia e condições:** O período do consumo de referência encontra-se no intervalo de um *ano*, contado a partir do dia 8 de Maio de 2008.

**Dados da situação de referência:**

- Potência dos aparelhos de iluminação actuais:

- Número dos aparelhos de iluminação tidos em conta: 48 do tipo fluorescente T8 e 82 lâmpadas fluorescentes compactas;
- Potência unitária dos aparelhos de iluminação:
  - Lâmpadas fluorescentes compactas de 23W;
  - Lâmpadas fluorescentes de 36W.
- Potencia média consumida: 1283,14W.
- Tempo de funcionamento dos aparelhos de iluminação actuais:
  - 8-20h de segunda a sexta, excepto fins-de-semana e feriados, num total de 3120 horas anuais.
- Consumo anual dos aparelhos de iluminação actuais ao longo do ano N:
  - Consumo actual: 4003,38 kWh/ano.

*Variável independente:* Nível de luminosidade exterior

*Factores estatísticos:*

- Períodos de ocupação: 8-20h de todos os dias úteis;
- Área: 490 m<sup>2</sup>;
- Indisponibilidade (falha ou manutenção) de circuitos ou de luminárias;
- Esquecimento de circuitos de iluminação ligados.

**Período de reporte:** 3 anos, com medição contínua.

**Base para o ajuste:**

*Situação:* Ajustes de perda de disponibilidade de um circuito de iluminação ou de uma luminária;

*Ajuste:* O cálculo consiste em adicionar ao consumo de energia um circuito de iluminação semelhante ou de uma luminária imediatamente vizinha, para a duração desta indisponibilidade;

*Situação:* Ajustes de esquecimento de circuitos de iluminação;

*Ajuste:* O consumo total da zona correspondente ao cenário excepcional será substituído pelo valor médio de consumo revelado por esta mesma zona, sobre o prazo de um dia em torno do evento excepcional.

**Procedimento de análise:** Na análise de dados, é criado um conjunto de formas de diagramas típicos (diagramas diários com consumo de energia unitário), correspondentes a um dia útil. Para cada diagrama tipo, há uma gama de valores de radiação em que este pode ser aplicado para modelizar o consumo de potência:

- Grupo 1 se o pico diário de radiação for inferior a 200 W/m<sup>2</sup>;

- Grupo 2 se o somatório diário da radiação for inferior a 7000 W/m<sup>2</sup> e pico diário de radiação superior a 200 W/m<sup>2</sup>;
- Grupo 3 se o somatório diário da radiação estiver entre 7000 W/m<sup>2</sup> e 14000 W/m<sup>2</sup> e se pico diário for superior a 200 W/m<sup>2</sup>;
- Grupo 4 se o somatório diário da radiação for superior a 14000 W/m<sup>2</sup>;

Através do valor da radiação média diária, é calculado um valor diário de energia consumida da seguinte forma:

- Grupo 1:

$$Energia_{calc1} = -1,17 \times 10^{-3} \times \sum Radiação_{sol.méd.} + 52,20$$

- Grupo 2:

$$Energia_{calc2} = -4,12 \times 10^{-3} \times \sum Radiação_{sol.méd.} + 70,92$$

- Grupo 3:

$$Energia_{calc3} = -6,32 \times 10^{-3} \times \sum Radiação_{sol.méd.} + 107,84$$

- Grupo 4:

$$Energia_{calc4} = -6,61 \times 10^{-4} \times \sum Radiação_{sol.méd.} + 43,39$$

Depois de se ter a energia consumida num dia, distribui-se esta pelos pontos da forma de diagrama correspondente.

**Preços da energia:** Os preços da energia serão indexados aos preços de referência da entidade reguladora e do distribuidor de energia em MT. As economias desenvolvidas são determinadas com base na tabela de custo adequado na seguinte equação:

$$\text{Economias valorizadas} = \text{Cref} - \text{Crep}$$

Onde:

- Cref - custo da energia durante o período da situação de referência + todos os ajustes;
- Crep - custo da energia durante o período de reporte + todos os ajustes.

As economias monetárias ajustadas devem ser determinadas utilizando a mesma escala de custo no cálculo de Cref e Crep. A economia é actualizada anualmente.

**Especificações do contador:** É apenas usado um ponto de contagem da potência, instalado a montante de todo o circuito de iluminação com as seguintes características:

- *Periodicidade:* a medição é contínua, os valores de potência são retirados a cada 15 minutos;
- *Instrumento:* CIRCUTOR POWER NET;

- **Precisão:** 0,5%±2 dígitos (Tensão); 0,5%±2 dígitos (Corrente); 1%±2 dígitos (Potências).

Os valores de radiação são obtidos numa estação meteorológica instalada a cerca de 200 metros, com as seguintes características:

- **Periodicidade:** a medição é feita a cada dez minutos;
- **Instrumento:** APOGEE precision amplified pyranometer SP-215 (5V);
- **Precisão:** ±5%.

**Responsabilidades de monitorização:** A empresa de serviços energéticos fica responsável por reportar e registar os dados de energia, variáveis independentes e factores estáticos dentro do limite de medição, durante o período de reporte.

**Precisão esperada:** Espera-se que para um nível de confiança de 90% se tenha um desvio entre -0,54997kWh e 0,59799kWh

**Orçamento:** Para se poder definir as poupanças, definiu-se este orçamento que contabiliza os gastos em instrumentação, leitura, análise e elaboração de relatórios para o período de referência e para o período de reporte.

	Instrumentação	Leitura e análise	Relatórios
Período de referência	860		
Período de reporte	0	500	500
Total	860	500	500
		Total geral	1860

Determinou-se que os custos totais relativos à M&V são de 1860€.

**Formato do relatório:** Relatório de consumo (modelo em anexo); Relatório de utilização diária (modelo em anexo); Relatório de situações de excepções (modelo em anexo).

**Garantia de qualidade:** No âmbito da certificação ISO 9001, a empresa inclui os procedimentos de Seguro Qualidade em vigor. O Manual Qualidade será comunicado ao Cliente.

**Justificação das estimativas:** Para além de outras vantagens os balastros electrónicos podem conseguir uma poupança energética até 47 % de energia face aos balastros convencionais. As lâmpadas fluorescentes T5 apresentam um aumento do rendimento luminoso de aproximadamente 20% face às lâmpadas fluorescentes T8, apresentam também uma melhor restituição de cores. Neste projecto serão trocadas na instalação t8 para t5, Lampadas T8 com balastro magnético por lâmpadas T5 Lampada: Master TL5 HE Super 80 35W/837,

Balastro: HF-P I 14-35 TL5 E II luminaria:a mesma apenas troca de pins. Com esta medida espera se obter uma poupança de energia anual de 932,98 kWh o que corresponde a um custo evitado de 83,97€ .

**Inspecções periódicas:** A empresa de serviços energéticos fica responsável por inspeccionar o equipamento instalado a cada mês do período de reporte para verificar se o equipamento ainda está a funcionar como previsto quando se determinou os valores estimados. Serão cumpridos todos os meios necessários para o bom funcionamento dos sistemas. Para se poder garantir uma boa fiabilidade dos sistemas, poderá ser exigida a presença de técnicos qualificados junto dos sistemas de uma forma mais intensiva.